

На правах рукописи



ЛЕ ДАЙ ЛАМ

**СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА АЗОТА В
ПОРШНЕВОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ РАСЧЕТАХ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕ-
ПЛОМАССООБМЕНА В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНОГО
РАСПОЛОЖЕНИЯ ГАЗОВОЙ ФОРСУНКИ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Чесноков Сергей Александрович

Официальные оппоненты: Заяц Юрий Александрович, доктор технических наук, доцент, декан внебюджетного факультета коммуникаций и автомобильного транспорта ФГКБОУ ВПО «Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище (военный институт) имени генерала армии В. Ф. Маргелова»;

Ахромешин Андрей Владимирович, кандидат технических наук, коммерческий директор ООО «Прайм-авто», г. Тула;

Ведущая организация: ФГКБОУ ВПО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академии» (СибАДИ)

Защита диссертации состоится « 06 » мая 2015 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.12 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, Тульская область, г. Тула, проспект Ленина, 92, ауд. 9–101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» и на сайте www.tsu.tula.ru

Автореферат разослан « ___ » марта 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Елагин Михаил Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и общее описание.

Снижение токсичности отработавших газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) уже длительное время остается проблемой номер один в современном двигателестроении. Очевидно, что развитие современных методов расчета и проектирования ДВС позволит прекратить отставание в решении этой проблемы, а также, вообще в конструировании и технологии производства двигателей и автомобилей.

Используемое обычно математическое описание рабочего процесса и горения в ДВС основано на законах термодинамики и предполагает наличие в камере сгорания однородных, или, в случае многозонных моделей, ступенчато-однородных полей температуры, коэффициента избытка воздуха α и, тем самым, состава продуктов сгорания. В то же время, как показывают теоретические и экспериментальные данные, заранее рассчитанные (и реально существующие) неоднородности поля α перед зажиганием могут существенно снизить долю оксидов азота и углерода, обеспечить надежное воспламенение и отсутствие детонации, а также малый расход топлива.

В работе предложена **двухэтапная** методика решения общей задачи, основанная на разделении газодинамических процессов (всасывания, впрыска, смесеобразования) и процессов горения во фронте пламени и за фронтом, в том числе в течение такта расширения.

В качестве первого этапа проведены расчеты двухмерных турбулентных полей скорости химически не реагирующей смеси с помощью интерактивной программы GAS2 проф. Дунаева В.А. Конечным результатом является поле коэффициента избытка воздуха (**КИВ**) α в камере сгорания (**КС**) перед зажиганием смеси. Рельеф этого поля зависит от расположения форсунки впрыска.

Поле α , а также поля скорости программы GAS2, использовались для решения задачи второго этапа расчета химической кинетики и турбулентного теплообмена при догорании за фронтом пламени и последующем расширении смеси. Химический турбулентный теплообмен (**ХТТ**) в ДВС используется в виде расчетного метода, изложенного проф. Чесноковым С.А. в 2005/09 г. в двух одноименных монографиях (ниже, по тексту, обозначенных *) и позволяет получить трехмерные поля температуры и содержания химически реагирующих компонентов, в том числе токсичного оксида азота NO.

Сочетание двухмерных и трехмерных задач позволяет решить основную проблему методик этого направления – сократить затраты машинного времени от нескольких суток до нескольких часов. Этой же цели служит сокращение химической кинетики горения: для бедных горючих смесей диапазона $\alpha \sim 1,0 \dots 2,0$ и медленных реакций догорания (в которых образуется оксид NO) - количество обратимых ведущих реакций составило 12 (из 131) для 13 компонентов (из 33). Для расположения клапанов, форсунки, свечи зажигания и КС в диаметральной плоскости цилиндра постановка двухмерных задач является, в значительной степени, оправданной.

Применение двухэтапного метода расчета содержания оксида NO в отработавших газах позволяет достаточно оперативно, в первом приближении, оценить взаимное расположение форсунки, клапанов, свечи зажигания, подобрать форму камеры сгорания, а также параметры впрыска и горения.

Более точные решения можно получить при использовании зарубежных трехмерных интерактивных программ.

Работы по развитию аналогичных методов ведут: Принстонский университет США (Dryer, F.L.; Held, T. J.; Marchese, A. J), Токийский государственный университет (Shoji, H.; Saima, A.), Штутгартский университет в Германии (Warnatz, J.; Riegler, U.G.), а также кафедра Поршневые двигатели МГТУ им. Н.Э. Баумана (Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе) и др. Среди этих работ ведущее положение занимают публикации НИИ химической физики РАН, в одной из которых полностью опубликован ДКМ горения метана в условиях ДВС проф. В.Я.Басевича (256 реакций для 29 частиц). Известны работы В.А. Звонова, В.А. Маркова, Н.Н. Патрахальцева, Л.В. Грехова, а также Д.Д. Матиевского и П.К. Сеначина по изучению процессов самовоспламенения и горения топлив в ДВС на основе химической кинетики, а также работы многих других ученых по моделированию горения в ДВС.

Цель работы. Определение рационального расположения форсунки на поверхности цилиндра ДВС, обеспечивающего низкий уровень содержания токсичного оксида азота в выхлопе двигателя, работающего на газовом топливе природный газ (метан).

Для этого необходимо решение следующих *задач*:

1. Расчет равновесных составов продуктов сгорания метана при различных КИВ и аппроксимация их полиномами.

2. Решение задачи одномерной химической кинетики горения метана в микроламинарном турбулентном фронте пламени для различных значений КИВ, что позволит получить температуру горения, выделение теплоты при горении и состав продуктов сгорания на выходе фронта.

3. Расчет, с помощью интерактивной программы GAS2, турбулентных полей скорости (и полей КИВ) при всасывании воздуха, впрыске метана и смешивании, а также, для химически не реагирующей смеси, полей скорости за фронтом горения и в такте расширения. Для этих же процессов вычислялось давление, температура и др. параметры.

4. Решение задачи движения фронта горения в неоднородной по КИВ горючей смеси в аналитическом виде.

5. Сокращение общего кинетического механизма горения метана для процесса догорания за фронтом пламени.

6. Расчет трехмерных полей температуры и содержания компонентов в области догорания за фронтом пламени и в процессе расширения смеси (задача ХТТ) при различных расположениях газовой форсунки.

Объект исследования. ДВС с непосредственным впрыском топлива типа Mitsubishi 4G93-DOHC-GDI (далее GDI), условно конвертированный под топливо природный газ (метан).

Предмет исследования. Процессы газодинамики и горения, происходящие при впрыске, смесеобразовании, горении и догорании за фронтом пламени, с образованием многокомпонентной смеси продуктов сгорания.

Методы исследования. Расчеты на ЭВМ с помощью газодинамической интерактивной программы GAS2 и программ метода ХТТ при горении.

Научная новизна:

- разработке двухэтапной методики решения общей задачи определение рационального расположения форсунки на поверхности цилиндра ДВС, основанной на условном разделении газодинамических процессов в цилиндре ДВС и процессов горения во фронте пламени, за фронтом и в течение такта расширения;

- предложении сокращенного варианта общей кинетики химических реакций горения метана для медленного процесса догорания бедной смеси за фронтом пламени при сохранении точности решения;

- обобщении метода ХТТ для применения не только бензиновых, но и газовых топлив, что потребовало разработки ряда алгоритмов решения и программ; получены расчетные результаты;

- Установлении наиболее рационального с точки зрения содержания оксидов азота расположения газовой форсунки в цилиндре ДВС, что является результатом разработки и реализации соответствующей методики.

Автор защищает:

1. Необходимость и научную целесообразность разделения решения общей задачи на два этапа:

- Расчет турбулентных полей скорости и КИВ при смесеобразовании, а также полей скорости при догорании за фронтом пламени и в течение такта расширения;

- Расчеты горения во фронте пламени, а также полей температуры и концентрации компонентов смеси при догорании метод ХТТ.

2. Физическую достоверность полученных полей скорости (и КИВ).

3. Результаты решения одномерной задачи химической кинетики горения метана в микроламинарном турбулентном фронте пламени при различных КИВ: значения температуры горения, теплоты горения и состав продуктов сгорания на выходе фронта.

4. Правомерность использования полученных данных для задания начального и граничных условий задачи догорания за фронтом пламени и в течение такта расширения.

5. Методику и результаты сокращения механизма химической кинетики горения метана для медленного процесса догорания бедной смеси.

6. Аналитические зависимости для скорости движения фронта пламени в неоднородном поле КИВ горючей смеси с учетом расширения продуктов сгорания.

7. Результаты решения трехмерной задачи ХТТ в зоне продуктов сгорания для нескольких положений газовой форсунки: поля содержания компонен-

тов смеси и итоговые зависимости для текущего содержания токсичного оксида NO в продуктах сгорания.

Достоверность результатов. Основана на использовании развитого, и широко представленного в литературе, общего математического описания газодинамики и тепломассообмена, неоднократно подтвержденного экспериментально, в том числе, для решенной в работе задачи, несколькими косвенными экспериментами.

Практическая ценность. Состоит в создании законченной методики, позволяющей при небольших затратах машинного времени определить наиболее выгодное расположение газовой форсунки, а при более общей постановке: оптимальные расположения клапанов и свечи зажигания, режимы их работы, геометрию камеры сгорания т.п.

Реализация работы. Материалы диссертации использованы в учебном процессе ряда дисциплин кафедры “Автомобили и автомобильное хозяйство” ТулГУ: “Автомобильные двигатели”, “Основы научных исследований на транспорте”, “Компьютерные и информационные технологии в науке и производстве”.

Основные результаты были доложены на VII региональной молодежной научно-практической конференции ТулГУ 2013 г. и научно-технических конференциях профессорского-преподавательского состава ТулГУ 2012 – 2014 гг.

Публикации. Результаты выполненной диссертационной работы отражены в пяти научных публикациях, из них две работы - в журналах, входящих в перечень ВАК.

Объем работы. Диссертация содержит 103 страниц текста, 33 рисунков, 11 таблиц и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 39 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность научной работы, указана цель и решаемые задачи, поясняется структура диссертации.

В разделе 1 по известным литературным данным описаны особенности горения газовых топлив (природного газа) в условиях ДВС.

Все горючие компоненты природного газа (в основном метан) отличаются более высокой детонационной стойкостью и октановым числом, чем бензины.

У природного газа и метана пределы воспламенения и пределы эффективной работы двигателя смещены в сторону бедных смесей, что в первую очередь сказывается на возможности достижения большей топливной экономичности. При этом, газовый двигатель может работать в широком диапазоне нагрузок. Более медленное сгорание газоздушных смесей по сравнению с бензовоздушными снижает “жесткость” работы двигателя.

По опубликованным разработкам непосредственный впрыск газового топлива наиболее целесообразно осуществлять через специальную форсунку, расположенную на боковой поверхности цилиндра и в конце процесса всасывания, чтобы повысить наполняемость цилиндра. Размещение форсунки на боковой поверхности цилиндра удобно тем, что в период сгорания и расширения

форсунка оказывается закрытой поршнем от объема продуктов горения и, тем самым, защищается от образования на ее поверхности нагара и прочих нежелательных воздействий.

Максимум оксида NO для газового двигателя смещен в сторону бедных смесей ($\alpha \sim 1,3$) и имеет примерно в 2 раза более низкое значение по сравнению с бензином. Содержание оксида CO в богатых смесях практически такое же, как для бензина, а при $\alpha \sim 1$ снижено в два раза.

Газовый двигатель допускает широкие возможности регулирования за пределом эффективного обеднения ($\alpha > 1,5$), т. е. в области, где и оксиды азота, и оксид углерода содержатся в очень малых количествах. Таким образом, оптимизация регулировок газового двигателя позволяет снизить поступление загрязнителей в атмосферу в несколько раз по сравнению с бензиновым.

В качестве объекта исследования выбран двигатель типа Mitsubishi 4G93-DOHC-GDI (далее GDI) с непосредственным впрыском топлива, условно конвертированный под газовое топливо природный газ (метан).

На рис. 1 и 2 изображены схемы цилиндра и камеры сгорания.

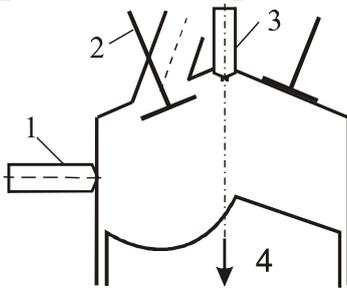


Рис. 1. Схема цилиндра двигателя:
1 – газовая форсунка; 2 – впускной клапан; 3 – свеча зажигания; 4 – поршень

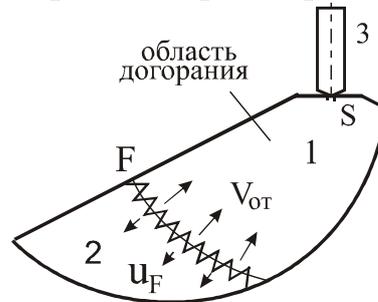


Рис. 2. Камера сгорания двигателя GDI:
1 – продукты горения; 2 – горючая смесь; F – фронт горения; 3 – электро-свеча зажигания; u_F – скорость фронта; $V_{от}$ – скорость оттока газов

Основные параметры двигателя: горючее – природный газ (метан); рабочий объем цилиндра - $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; его диаметр – 0,08 м; степень сжатия – 12; коэффициент остаточных газов – 0,05; номинальные обороты коленчатого вала – 3000 об/мин; средний КИВ в камере сгорания – 1,5.

В разделе 2 кратко рассмотрены основы кинетики горения и подготовка исходных данных химической кинетики, изложены вопросы определения равновесного состава продуктов сгорания и аппроксимация его полиномами.

Проведено тестирование механизма горения метана проф. Басевича В.Я. (128 обратимых реакций) при расчете нульмерной кинетики горения в ламинарном фронте пламени. Для основных компонентов конечные данные кинетики отличаются от равновесных не более чем на 3 %.

Рассмотрено решение одномерной задачи кинетики горения метана на микроламинарном участке турбулентного фронта горения [*]. Расчеты с учетом остаточных газов ($\gamma = 0,05$) при различных КИВ α , в диапазоне характерном для газовых топлив, позволили получить: температуру горения на выходе фронта T_G , выделение теплоты при горении Q и нормальную скорость горения u_n (рис. 3). Закономерности их изменения и значения ламинарной скорости горения со-

ответствуют имеющимся литературным данным. Кроме того, близость максимального выделения теплоты при горении во фронте и низшей теплотворной способности метано-воздушной смеси (2790 кДж/кг) подтверждает энергетическую полноценность кинетической схемы Басевича В.Я.

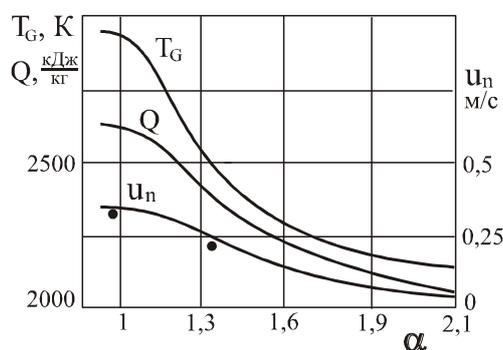


Рис. 3. Температуры горения, тепловыделение и нормальная скорость ламинарного горения при различном избытке воздуха ($p = 4$ МПа):
 — расчет; • экспериментальные скорости горения [Льотко В.]

В табл. 1 приведены молярные доли основных компонентов, полученные к концу горения в расчетах кинетики (К) и равновесном (Р) термодинамическом расчете (при тех же α , T_G , p). Различие этих данных по каждому компоненту составляет менее 20 %, что позволяет сделать вывод о равновесном состоянии смеси (кроме NO) к концу горения во фронте.

Таблица 1

Молярные доли основных компонентов в конце процесса горения во фронте по данным одномерной кинетики (К) и равновесных (Р) расчетов

α	Вид расчета	H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	O ₂	OH
0,9	К	0,107D-01	0,151	0,502D-01	0,098	0,507D-02	0,00769
	Р	0,961D-02	0,135	0,451D-01	0,087	0,497D-02	0,00725
1,0	К	0,497D-02	0,140	0,270D-01	0,106	0,141D-01	0,00851
	Р	0,488D-02	0,127	0,261D-01	0,095	0,119D-01	0,00783
1,2	К	0,104D-02	0,120	0,616D-02	0,104	0,380D-01	0,00562
	Р	0,104D-02	0,113	0,592D-02	0,098	0,322D-01	0,00527
1,5	К	0,208D-03	0,098	0,118D-02	0,086	0,710D-01	0,00308
	Р	0,210D-03	0,094	0,115D-02	0,081	0,642D-01	0,00294

В разделе 3 рассмотрено догорание за фронтом пламени (см. рис.2). Причиной догорания является неоднородное поле избытка воздуха в камере сгорания перед воспламенением и при горении, образование струй оттока от фронта различной температуры и состава продуктов сгорания, содержащего избыток или недостаток горючего. При перемешивании этих струй инициируются реакции догорания оксида углерода CO и образования оксида азота NO. При решении этой задачи в работе используется метод химического турбулентного теплообмена (ХТТ) в трехмерной постановке.

Для уменьшения машинного времени в задаче догорания возможно сокращение кинетического механизма Басевича В.Я. При решении тестовой кинетической задачи горения метана в заданный момент времени на печать выводились фрагменты данных для каждого компонента.

Каждый фрагмент состоял из двух абзацев (табл. 2): в первом - приведены обозначения слагаемых правой части уравнения кинетики, например, для оксида СО с указанием номера реакции (S - прямые реакции, SS – обратные); во втором, в том же порядке, численные значения этих слагаемых – скоростей реакций.

Таблица 2

Фрагмент результатов для кинетического уравнения образования СО

$$\begin{aligned}
 \text{CO} = & -S(22) + SS(22) - S(23) + SS(23) - S(24) + SS(24) - S(25) + SS(25) \\
 & - S(30) + SS(30) + S(32) - SS(32) + S(35) - SS(35) + S(36) - SS(36) \\
 & + S(37) - SS(37) + S(45) - SS(45) + S(49) - SS(49) + S(57) - SS(57) \\
 & + S(58) - SS(58) + S(62) - SS(62) + S(63) - SS(63) + S(64) - SS(64) \\
 & + S(74) - SS(74) - S(123) + SS(123) + S(125) - SS(125) \\
 & \cdot \begin{matrix} .70\text{E}+02 & .70\text{E}+02 & .80\text{E}-01 & .30\text{E}+00 & .40\text{E}-01 & .20\text{E}+00 & .50\text{E}-01 & .50\text{E}-01 \\ .60\text{E}-02 & .70\text{E}-02 & .60\text{E}-03 & .60\text{E}-03 & .30\text{E}-03 & .10\text{E}-02 & .30\text{E}-05 & .10\text{E}-04 \\ .90\text{E}-07 & .40\text{E}-06 & .20\text{E}-18 & .50\text{E}-19 & .20\text{E}-12 & .20\text{E}-12 & .10\text{E}-13 & .30\text{E}-13 \\ .40\text{E}-15 & .80\text{E}-15 & .20\text{E}-18 & .20\text{E}-18 & .10\text{E}-17 & .60\text{E}-18 & .20\text{E}-18 & .20\text{E}-18 \\ -.20\text{E}-21 & .30\text{E}-23 & .30\text{E}-14 & .30\text{E}-14 & .10\text{E}-21 & .50\text{E}-21 & & \end{matrix}
 \end{aligned}$$

Можно увидеть, что скорости реакций, определяющие содержание данного компонента, различаются на десятки порядков. Это позволило выявить номера ведущих реакций по образованию каждого компонента, например, для СО и СО₂ – реакция № 22, Н - № 10, Н₂ – № 1, Н₂О - № 4, О₂ – № 10, ОН – № 4, 17 и т.д. Нумерация всех реакций приведена в приложении к диссертации.

Для горения бедных смесей газовых топлив характерен интервал КИВ $\alpha = 0,9-2,1$, в этом случае число ведущих реакций сильно уменьшается (табл. 3).

Таблица 3

Ведущие реакции догорания и расширения для метана

1	ОН+Н ₂ =Н+Н ₂ О	5	ОН+Н=Н ₂ О	9	СО+ОН=СО ₂ +Н
2	ОН+О=Н+О ₂	6	Н+НО ₂ =Н ₂ +О ₂	10	Н+НО=Н ₂ +О
3	ОН+Н=О+Н ₂	7	Н+О ₂ =Н ₂ О	11	Н+О ₂ =НО+О
4	ОН+ОН=О+Н ₂ О	8	ОН+ОН=Н ₂ О ₂	12	Н+ОН=НО+Н

Сравнение мольных долей компонентов в расчетах до- и после сокращения числа реакций показывает различие не более 5 %. Реакции образования NO соответствовали известному механизму Зельдовича и не подлежали сокращению.

В разд. 2 показано, что состав смеси на выходе фронта горения близок к равновесному. Равновесные доли компонентов, полученные для различных α , сведены в табл. 4.

Оксид азота NO во фронте горения только начинает накапливаться, поэтому доли NO и радикала N принимаем равными нулю. Для перехода к массовым долям g_{iF} будет использоваться известная зависимость $g_i = r_i \mu_i / \mu_{см}$.

Движение фронта горения определяется скоростью турбулентного выгорания и скоростью температурного расширения образующихся продуктов сгорания. Последнее приводит к сжатию горючей смеси. В случае двухмерной

(плоской) задачи для скорости фронта удастся получить аналитические решения.

Турбулентная скорость горения оценивалась как средняя во времени по данным спектрометрии ДВС [*]: $u_s = L/\tau_{гор}$, где L – длина пути горения; $\tau_{гор}$ – продолжительность горения (по длительности излучения радикала OH). Последняя, для метана, по литературным данным, примерно в 1,5 раза превышает время сгорания бензо-воздушной смеси и составляет около 1,5 – 1,6 мс при $n = 3000$ об/мин. Для диапазона коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,9 - 2,1$, используемого для метана, значение u_s будем считать не зависящим от α и «средним» (для $\alpha_{cp} = 1,5$).

Таблица 4

Температура и мольный равновесный состав продуктов сгорания на выходе фронта горения

α	0.9	1.3	1.7	2.1
T_F, K	.283E+04	.252E+04	.220E+04	.195E+04
H_2	.147E-01	.895E-03	.852E-04	.116E-04
H_2O	.181E+00	.144E+00	.114E+00	.939E-01
H_2O_2	.960E-06	.168E-05	.101E-05	.458E-06
HO_2	.905E-05	.266E-04	.180E-04	.885E-05
O	.901E-03	.650E-03	.143E-03	.301E-04
O_2	.439E-02	.422E-01	.794E-01	.104E+00
OH	.834E-02	.545E-02	.184E-02	.614E-03
CO	.371E-01	.285E-02	.236E-03	.270E-04
CO_2	.634E-01	.709E-01	.574E-01	.471E-01
H	.241E-02	.158E-03	.935E-05	.766E-06
N_2	.683E+00	.722E+00	.738E+00	.748E+00

В итоге, скорость фронта горения в неоднородной смеси:

$$u_F = \frac{1}{\frac{1}{u_s \theta} + \left(1 - \frac{1}{\theta}\right) \frac{F}{W_{KS}} \tau} \quad (1)$$

Здесь: θ - отношение температур продуктов сгорания $T_1(\alpha)$ и горючей смеси T_2 ; $F(\tau)$ - площадь поверхности горения; W_{KS} - объем камеры сгорания; τ - время.

В начале горения скорость фронта в 3 – 4 раза превышает скорость выгорания за счет температурного расширения продуктов сгорания, к концу горения их значения выравниваются. Поджатие фронтом поля КИВ горючей смеси учитывается в программах простыми пропорциями.

В основополагающей монографии Р.И. Нигматулина (Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987) содержание компонентов продуктов сгорания, в диффузионном приближении гомогенной смеси, определяется уравнениями

сохранения массы компонента, а также уравнениями энергии и движения смеси. Турбулентное поле скорости смеси известно из решения задачи газодинамики для химически не реагирующей смеси с помощью интерактивной программы GAS2.

В монографии [*] показано, что в рамках задачи ХТТ поля температур и массовых долей компонентов определяются **уравнениями энергии и сохранения массы** в виде:

$$\rho \frac{dU}{d\tau} = -\nabla^k q^k + Q + \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{d\tau}. \quad (2)$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial \tau} + \vec{u} \cdot \nabla g_i = \frac{1}{\rho} \nabla (\rho D_i \nabla g_i) + \frac{1}{\rho} \sum_{j=1}^N J_{ji}. \quad (3)$$

Здесь: $U = c_v T$; $k=1,2,3$ -номера координат x,y,z ; по повторяющимся k проводится суммирование; Q и J –источники теплоты и массы компонентов; i –номер компонента; j – номер реакции. Остальные обозначения общепринятые [*].

В качестве **начального условия** задается начальное поле решения небольшого радиуса вокруг точки зажигания, которое необходимо для образования массива ячеек, с которых начинается расчет на ЭВМ. Это поле будем считать однородным, в нем задается значение КИВ α вблизи точки зажигания, а также температура и равновесные массовые доли компонентов ему соответствующие. Т.о. в небольшой зоне вокруг точки зажигания задаются:

$$T = T_n = T_F(\alpha); \quad g_i = g_{in} = g_{iF}(\alpha) \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, N; \quad (4)$$

В качестве **граничных условий** для смеси продуктов сгорания задаются: перемещение фронта горения (в неоднородном поле α), определяющее границы поля решения; температура фронта $T_F(\alpha)$ и равновесный состав продуктов горения $g_{iF}(\alpha)$ – см. табл. 4, а также температура границы поля решения у стенки камеры сгорания T_w и условия отсутствия потоков компонентов на твердых границах.

Т.о., имеем на выходе фронта горения для местного значения α :

$$T = T_F(\alpha), \quad g_i = g_{iF}(\alpha) \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, N; \quad (5)$$

на границе турбулентного поля у стенок камеры сгорания:

$$T = T_w; \quad \partial g_i / \partial n = 0 \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, N; \quad (6)$$

Удобно использовать понятие **кратности коэффициента турбулентного обмена (КТО) N_T** , как отношения турбулентной и ламинарной вязкости (теплопроводности или коэффициента диффузии). На рис. 4 представлен общий вид типичного поля КТО в камере сгорания, построенный по данным программы GAS2. В дальнейшем используется среднее по объему значение КТО N_T^{cp} , величина которого постепенно уменьшается во времени процесса [*] (рис. 5).

Турбулентные характеристики переноса определяются полем кратности коэффициента турбулентного обмена N_T :

$$a_T = a_{лам} N_T; \quad D_T = D_{лам} N_T.$$

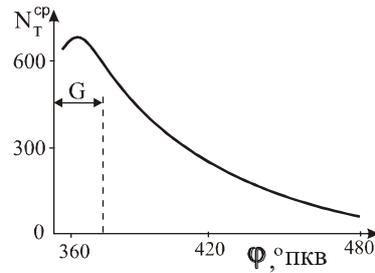
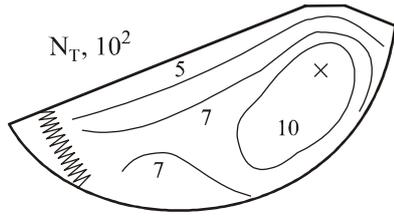


Рис. 4. Типичное поле коэффициента турбулентного обмена в конце горения

Рис.5. Изменение среднего КТО по углу поворота колен. вала: G–период горения

Термическое сопротивление ламинарного подслоя толщиной δ_L было учтено [*] в виде простого соотношения стационарной теплопередачи в форме граничного условия 4-го рода.

$$T_w = (T_0 + AT_{cp}) / (1 + A), \quad \text{где } A = \delta_L N_T / L_T. \quad (7)$$

Здесь λ_L и $\lambda_T = \lambda_L N_T$ - ламинарный и турбулентный коэффициенты теплопроводности продуктов сгорания; L_T - характерный размер турбулентной области; T_0 - средняя температура поверхности стенки, $T_0 \approx 600 \text{ K}$.

Решение задачи ХТТ проводилось методом расщепления шага по времени. Внутри расщепленного шага по каждой из координат использовался метод прогонки, для вычисления источников тепла и массы компонентов применялся метод Гира. Выбор достаточно простых и устойчивых методов решения позволило применять большой шаг по координатам (на сетке поля $33 \times 33 \times 17$). Это существенно уменьшило машинное время решения задачи ХТТ.

Подтверждения модели ХТТ проводились следующим образом [*]:

- по данным излучения радикала ОН в спектре пламени ДВС;
- тестовыми расчетами ХТТ в частном случае однородных полей КИВ в КС;
- тестовыми расчетами ХТТ и сравнением с экспериментальными данными по выбросу оксидов NO и CO для двигателя ВАЗ-2111.

В разделе 4 рассмотрены результаты работы.

При расчетах *полей скорости при впрыске и смесеобразовании* широко используется интерактивная программа GAS2 проф. Дунаева В.А., позволяющая на основе уравнений Навье-Стокса и $k-\varepsilon$ модели турбулентности получить результаты для двухкомпонентной (метан+воздух) горючей смеси.

В такте всасывания воздуха поля скорости при движении поршня вниз и всасывании воздуха через открытый впускной клапан изображены на рис. 6 и одинаковы для всех вариантов расположения форсунки. Впускной канал имеет входной конус, обеспечивающий безотрывное втекание воздуха (свеча зажигания отмечена буквой S).

Характерной особенностью поля скорости является образование за открытым клапаном двух вихревых зон А и В, причем из-за особенностей геометрии камеры сгорания правая струя 2 представляет собой плотную пристенную струю большей мощности, чем быстро расширяющаяся левая струя. Этот эффект сохраняется до конца всасывания и определяет дальнобойность струи форсунки в зависимости от ее расположения.

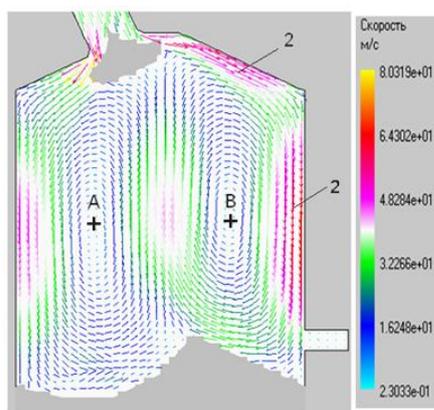


Рис. 6. Поля скорости при всасывании в конце такта (170° пкв)

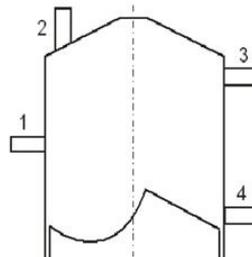


Рис. 7. Варианты расположения форсунок на поверхности цилиндра

Впрыск газового топлива производится в конце такта всасывания в течение 1,4 мс. Такой впрыск, в период низкого давления в цилиндре при всасывании, позволяет повысить степень наполнения цилиндра. Треугольный импульс скорости впрыска достигает в максимуме 110 м/с. Масса впрыскиваемого горючего обеспечивает одинаковое среднее значение коэффициента избытка воздуха $\alpha_{\text{ср}} = 1,5$ для всех рассматриваемых ниже случаев. Расчеты проводились для различных вариантов расположения газовых форсунок на стенках цилиндра (рис. 7), в этом случае можно ожидать полей КИВ различной неоднородности.

Поля концентраций метана при впрыске для вариантов 1 – 4 представлены на рис. 8. Степень заполнения всей полости цилиндра определяет однородность конечного поля КИВ (рис. 9).

Так, в положении 1, струя метана легко пробивает слабую циркуляцию воздуха у левой стенки и пересекает ось цилиндра. Полость цилиндра заполняется метаном достаточно равномерно. Неоднородность поля мала ($\Delta\alpha = \alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{min}} \approx 0,5$). Относительно богатая смесь расположена вблизи точки зажигания S.

В положении 2 вертикальный впрыск определяет попутное движение струй воздуха и метана. Это обеспечивает быстрое попадание метана в левую нижнюю часть полости, что при дальнейшем сжатии приведет к нежелательному эффекту – появлению зоны, богатой горючим вдали от точки зажигания S (в). предыдущем случае, $\Delta\alpha \approx 1,2$ (рис. 9).

В положении 3 мощная пристенная струя воздуха 2 (рис. 6) препятствует распространению струи метана и масса горючего накапливается в правой части цилиндра. В дальнейшем эта масса постепенно вытесняется из зазора между правой плоскостью поршня и крышкой камеры сгорания создавая зону богатой смеси у точки зажигания S ($\alpha = 1,1$). В конце сжатия в КС образуется сильно неоднородное поле коэффициента избытка воздуха α горючей смеси, с неоднородностью $\Delta\alpha = \alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{min}} \approx 0,9$. Область наиболее бедной смеси расположена в максимально удаленной зоне камеры сгорания, что практически гарантирует отсутствие детонации.

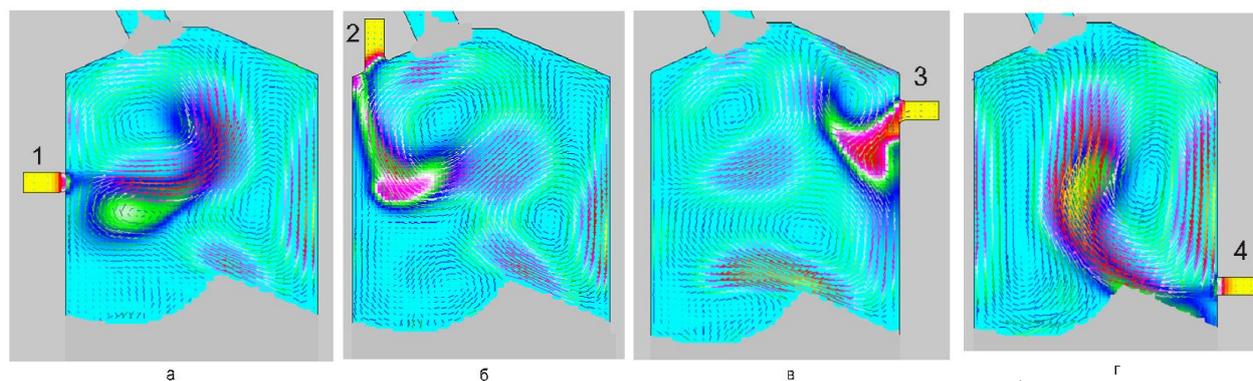


Рис. 8. Поля скорости и содержания горючего в конце впрыска для положений форсунки: 1 (а), 2 (б), 3(в) и 4 (г)

В положении 4 струя форсунки попадает в попутный поток воздуха мощной вихревой зоны в правой части цилиндра. Это обуславливает быстрый перенос массы горючего вверх и в правую часть цилиндра. Вытесняемая из щелевого зазора масса метана создает богатую зону в окрестности точки зажигания S. Область бедной смеси образуется в нижней части камеры сгорания. Неоднородность поля велика - $\Delta\alpha \approx 1,1$, но минимальный уровень КИВ наблюдается в средней части КС.

Таким образом, для всех вариантов расположения форсунки, кроме № 2 (в дальнейшем не рассматриваем), характерно наличие относительно богатой горючим смеси вблизи форсунки ($\alpha \approx 1,0 - 1,2$), что облегчает воспламенение. В то же время рельеф полей α вдали от свечи существенно различается.

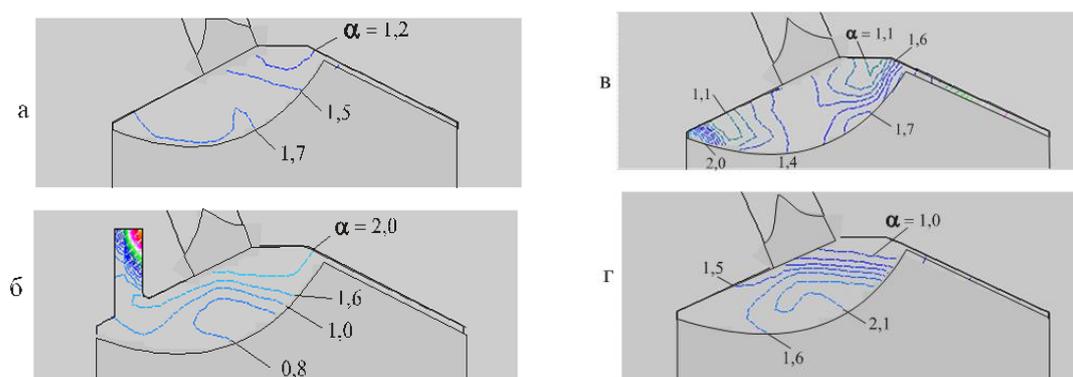


Рис. 9. Конечные поля коэффициента избытка воздуха в КС (перед зажиганием) для различного положения форсунки: а – 1; б - 2; в – 3; г - 4 (см. рис. 7)

Зона наиболее бедной смеси вдали от точки зажигания наблюдается для вариантов № 1 ($\alpha \approx 1,7$) и № 3 ($\alpha \approx 2,0$). Указанные варианты расположения форсунки на данном этапе будем считать оптимальными. Давление в конце сжатия составляет 2,4 МПа. Полученные поля коэффициента избытка воздуха в КС позволяют перейти к решению задачи горения.

Поля скорости при догорании и расширении образуются под действием оттока от фронта (см. рис. 2) и рассчитываются с помощью интерактивной программы GAS2.

Задача решалась для вариантов расположения форсунки № 1, 3, 4. В качестве примера рассмотрим результаты варианта № 3, для которого поле α перед зажиганием является *сильно неоднородным*, $\alpha = 1,1 - 2,0$ при среднем значении $\alpha_{\text{ср}} = 1,5$. Фронт горения разделим на 3 участка (рис. 10), каждый из которых постепенно (во времени) проходит свои зоны α .

При подготовке исходных данных для программы GAS2 это позволяет задать ряд параметров: скорость движения фронта, скорость оттока и температуру участка фронта в виде кусочно-линейных аппроксимаций во времени процесса. В результате расчета получены турбулентные поля скорости за фронтом пламени, в зоне продуктов сгорания. Значения скорости оттока составляют 25 – 70 м/с. В верхней части камеры сгорания формируется устойчивая вихревая зона.

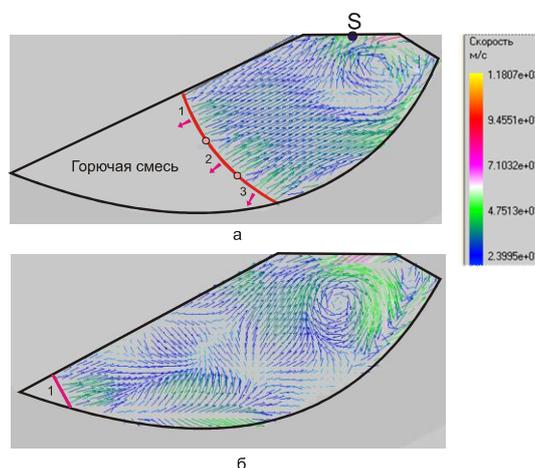


Рис. 10. Поля скорости в КС для середины (а) и конца (б) горения:

S – точка зажигания; 1, 2, 3 – участки фронта горения

Поле скорости для такта *расширения продуктов горения* в цилиндре представлено на рис. 11 - для него характерна двух вихревая структура.

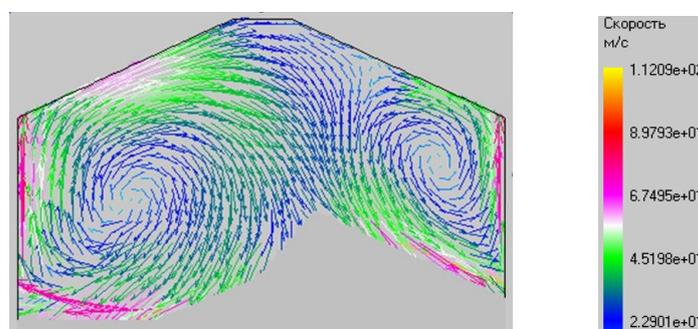


Рис. 11. Поле скорости в конце химически активного расширения (590 °ПКВ)

В расчетах трехмерных полей температуры и содержания компонентов **методом ХТТ** использовались файлы полей скорости, полученные с помощью интерактивной программы GAS2.

Кроме того, в качестве исходных данных были использованы:

- поле значений α в камере сгорания перед воспламенением (рис. 9, в);
- логарифмические полиномы зависимости от местного значения α температур участков фронта T_F и равновесного состава продуктов сгорания g_i на выходе фронта (см. табл. 4);
- радиус начального сферического объема продуктов сгорания вокруг точки зажигания 8 мм;
- начальное давление в этом объеме равно давлению сжатия $p_n = 2,4$ МПа;
- среднее по начальному объему α_{min} ; начальная температура $T_n = T_F(\alpha_{min})$; начальные равновесные доли компонентов продуктов сгорания $g_n = g_i(\alpha_{min})$;
- геометрия поля решения - форма и скорость перемещения фронта горения и поршня, см. (1).

Трехмерные температурные поля и поля неравновесного содержания характерных компонентов изображены на рис. 12 и 13 (в диаметральном сечении). Здесь: S – точка зажигания; F – фронт горения; g - массовая доля компонента; x - центр вихревой зоны при горении. В начале горения, как показано в разд. 2, быстро движущийся фронт интенсивно поджимает свежую горючую смесь, деформируя при этом поле коэффициента избытка воздуха α . В связи с этим, поле температуры T концу горения (рис. 12) и, соответственно, поля компонентов g, заметно отжимаются в направлении движения фронта – вниз и влево.

Для поля температур характерно наличие области повышенных температур (~ 2700 К) в вихревой зоне, которая также смещается под влиянием фронта горения. Область высоких температур практически соответствует стехиометрической смеси ($\alpha \sim 1-1,2$). Снижение температуры вихря относительно температуры горения, полученной в разд. 2, объясняется наличием остаточных газов и теплоотдачей в стенки камеры сгорания. Отметим, что на рис. 12 и 13 стрелкой указана температура границы поля решения T_w [*], а не температура стенки, см. (7).

Окончание горения характеризуется полями компонентов, которые можно разделить на две группы [*]. Рельеф полей радикалов OH, O, CO, NO и др. соответствует полю температур T. Это объясняется высокой скоростью химических реакций образования радикалов при больших температурах и преобладанием химической кинетики над турбулентным конвективно-диффузионным переносом в поле скоростей.

Геометрия полей тяжелых молекул O_2 , а также H_2O и CO_2 определяется расходом (или образованием) этих частиц в сравнительно медленных реакциях зон повышенного или пониженного избытка воздуха. Так, максимальное содержание кислорода O_2 соответствует конечной зоне коэффициента избытка воздуха $\alpha \sim 2,0$. Кроме того, вверху камеры сгорания снижение доли O_2 объясняется расходом кислорода на образование паров воды H_2O , а также оксидов углерода CO и CO_2 . Поэтому эти компоненты интенсивно образуются в верхней части камеры сгорания, где горела относительно богатая смесь ($\alpha \sim 1,1$).

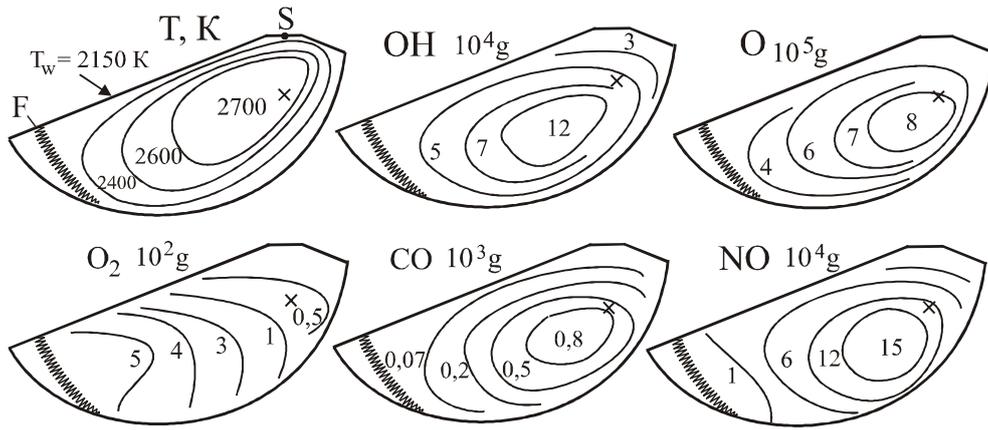
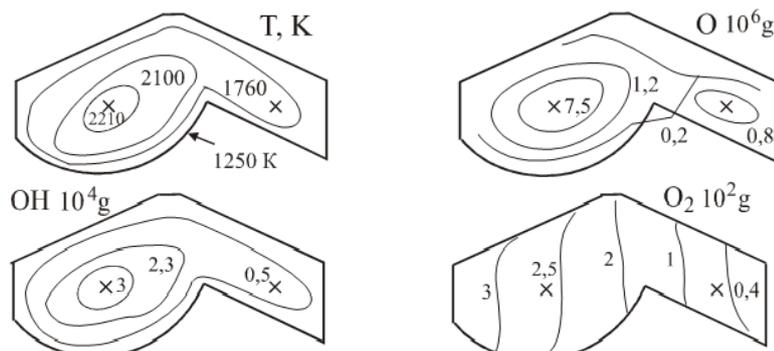


Рис. 12. Поля температуры T и массовых долей характерных компонентов g в диаметральном сечении камеры сгорания двигателя GDI в конце горения ($\tau = 1,5$ мс; $n = 3000$ об/мин; $\gamma = 0,05$; $\varphi = 400^\circ$ пкв)

Снижение доли NO имеет место в бедной и, сравнительно, холодной смеси в конце горения. Отметим, что полное “замораживание” реакций образования NO происходит при температурах ниже 2200...2400 К. Аналогичное “замораживание” реакций выгорания оксида CO наблюдается при низких температурах ~ 1400 К. Конечная доля CO в отработавших газах становится пренебрежимо малой, поскольку исходная горючая смесь содержала значительный избыток воздуха ($\alpha_{cp} = 1,5$).

Для процесса расширения смеси на рис. 13 представлены поля основных компонентов в конце периода активных реакций, т.е. при температурах не ниже уровня ~ 2200 К – температуры “замораживания” реакций образования NO.

Как и на рис. 12, максимумы температуры и содержания радикалов OH, O, CO и др. совпадают. Причиной является то, что для центральной зоны турбулентных вихрей характерны малые скорости, низкая интенсивность перемешивания и более медленные скорости реакций расходования радикалов при общем остывании смеси. Для тяжелых молекул, например, кислорода O_2 и др. преобладает влияние конвективного переноса масс в вертикальном направлении. Этот эффект проявляется и для радикала NO, поскольку при низких температурах его реакции сильно замедляются. Напомним, что давление слабо влияет на кинетику реакций.



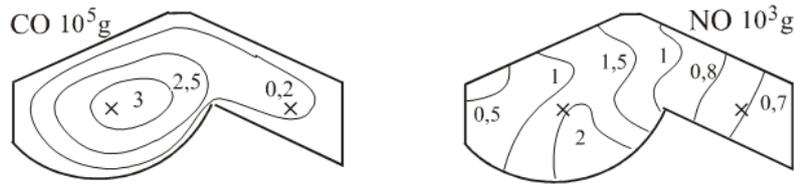


Рис. 13. Поля температуры T и массовых долей характерных компонентов g в цилиндре двигателя GDI в конце периода активных химических реакций ($\tau = 4$ мс; $n = 3000$ об/мин; $\gamma = 0,05$; $\varphi = 445$ °ПКВ)

В качестве **итогового результата** на рис. 14 приведены графики изменения среднеобъемной мольной доли оксида азота r_{NO} во времени (углу ПКВ), вплоть до выхлопа, для вариантов расположения форсунки № 1, 3 и 4 (см. рис. 7).

Указаны диапазоны изменения коэффициента теплоотдачи α . При низких температурах, $T < 2200 \dots 2400$ К, наблюдается “закаливание” содержания оксида NO и его доля остается постоянной. Наименьшее конечное содержание $r_{NO} = 0,1\%$ получено для варианта расположения форсунки № 3.

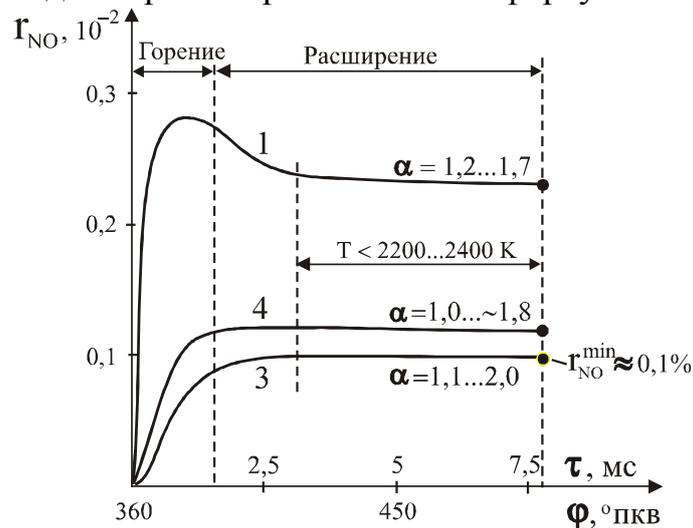


Рис. 14. Изменение среднеобъемной мольной доли оксида азота во времени (углу ПКВ) для вариантов расположения форсунки 1, 3, 4

Максимальное давление в цилиндре по данным расчета по программе GAS2 (т.е. без учета теплоты догорания) для вариантов расположения форсунки № 1, 3 и 4 достигало, соответственно: 5,0; 4,2; 4,4 МПа. Среднее индикаторное давление составило $p_i = 0,8; 0,65; 0,7$ МПа. Таким образом, давление p_i , характеризующее энергетические возможности двигателя, минимально для варианта № 3, что является своеобразной “платой” за низкое содержание оксида азота.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена и апробирована методика определения оптимального расположения газовой форсунки в поршневом двигателе, обеспечивающая ми-

нимальное содержание оксида азота в отработавших газах объекта исследования.

2. Применен алгоритм раздельного решения общей задачи, включающий в себя расчеты двухмерных турбулентных полей скорости с помощью интерактивной программы GAS2 проф. Дунаева В.А. и решение трехмерной задачи химического турбулентного теплообмена, поставленной проф. Чесноковым С.А.

3. Решена задача одномерной химической кинетики горения метана в микроламинарном турбулентном фронте пламени для различных значений КИВ. Проведен расчет равновесных составов продуктов сгорания метана при различных КИВ и аппроксимация их полиномами. Показано, что состав смеси на выходе фронта можно считать равновесным (кроме оксида NO).

4. Проведены расчеты *полей скорости* в приближении турбулентной химически не реагирующей смеси для процессов всасывания, сжатия и смесеобразования в цилиндре, для конвективного движения в области за фронтом горения и при последующем расширении вплоть до выпуска отработавших газов. Для этих же процессов вычислялось давление, температура, плотность и др. параметры.

5. При всасывании воздуха отмечено наличие в цилиндре двух циркуляционных зон различной интенсивности. Это позволило выбрать четыре варианта расположения форсунки, истекающая струя которой может быть сопутствующей или пересекающей поток воздуха на разных участках его циркуляции. Среднее значение коэффициента избытка воздуха (КИВ) в камере сгорания (КС) $\alpha_{\text{ср}} = 1,5$ для всех вариантов. Получены поля КИВ в КС для всех вариантов расположения форсунки. Впрыск форсунки № 2 создает заведомо невыгодное поле α .

6. Методика разделения фронта на несколько участков, каждый из которых проходит свои зоны α , позволила подготовить исходные данные для программы GAS2: скорость движения фронта, скорости оттока газов от фронта и температуры участков фронта, а также задать их в виде простых кусочно-линейных аппроксимаций во времени процесса.

7. Проведено сокращение общего механизма горения метана Басевича В.Я. (128 реакций) для медленного процесса догорания за фронтом пламени. Для бедных смесей газовых топлив ($\alpha = 0,9 - 2,1$) число ведущих обратимых реакций уменьшено до 12. Сравнения результатов тестовых расчетов догорания показывают расхождение не более 5 %.

8. Проведен расчет трехмерных полей температуры и содержания компонентов в области догорания за фронтом пламени и в процессе расширения смеси (задача ХТТ), получены графики изменения среднеобъемной мольной доли оксида азота r_{NO} во времени (углу ПКВ) вплоть до выхлопа для вариантов расположения форсунки № 1, 3 и 4. Наименьшее конечное содержание оксида азота в отработавших газах $r_{NO} = 0,1\%$ получено для варианта расположения форсунки № 3, который можно рассматривать как *рациональный*.

9. *Максимальное давление* в цилиндре для вариантов расположения форсунки № 1, 3 и 4 достигало, соответственно, 5,0; 4,2; 4,4 МПа. Среднее индикаторное давление составило $p_i = 0,8; 0,65; 0,7$ МПа. Таким образом, давление p_i - характеризующее энергетические возможности двигателя, минимально для варианта № 3.

10. Предложенная методика двухэтапного проведения расчетов (по программе GAS2 и методом ХТТ) позволяет в течение не более 3 – 4 часов машинного времени на ПЭВМ с процессором INTEL ... Core i7-4770x4, 3.4 ГГц, 16 Гб определить конечное содержание оксида азота в отработавших газах для различного расположения форсунки. Метод можно использовать при вводе более обширных данных: для различных режимов впрыска, геометрии камеры сгорания, изменения режима работы двигателя, применения рециркуляции отработавших газов и т.п.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. **Ле Дай Лам**, Радько А.Е., Лукин С.Э. Применение полиструктурной модели горения в дизелях. Докл. VII региональной молодежной НПК ТулГУ. Часть 1. Секция техн. наук. Изд-во ТулГУ. – 2013. С. 171-172.

2. S. Lukin, **Le Dai Lam**. Model poli-struktural combustion in internal-combustion engine. // Innovative development trends in modern technical sciences: problems and prospects. CA, USA, B&M Publishing, 2013, p. 81-84.

3. S. Lukin, **Le Dai Lam**, A. Radko. Calculation of combustion and formation of nitrogen oxide. // Innovative development trends in modern technical sciences: problems and prospects. CA, USA, B&M Publishing, 2013, p. 84-88.

4. Дунаев В.А. Расчеты смесеобразования в газовом двигателе с помощью интерактивной программы GAS2-DWS / С.А. Чесноков, **Ле Дай Лам**, С.Э. Лукин // Известия ТулГУ. Серия "Технические науки". Вып. 11. Изд-во ТулГУ. 2013. С. 172-179.

5. Чесноков С.А., Расчеты горения и расширения в газовом двигателе с помощью интерактивной программы GAS2-DWS/ **Ле Дай Лам**, С.Э. Лукин // Известия ТулГУ. Серия "Технические науки". Вып. 11. Изд-во ТулГУ. 2013. С. 180-187.