

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели

(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Методика расчета концентрации оксида азота в ОГ поршневого  
ДВС по параметрам характеристик сгорания метановодородовоздушной  
смеси

Студент

М.К. Айрапетян

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель  
Консультанты

А.П. Шайкин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д.т.н., профессор А.П. Шайкин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**Допустить к защите**  
Заведующий кафедрой

к.т.н. Д.А. Павлов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Критический анализ опубликованных материалов по теме диссертации. Формулировка цели и задач исследования .....	5
1.1 Механизм образования и разложения $\text{NO}_x$ при сгорании топливно-воздушных смесей.....	5
1.2 Особенности сгорания ТВС в поршневом ДВС с использованием искрового зажигания .....	10
1.3 Особенности механизма образования оксида азота в тепловых поршневых двигателях с внешним смесеобразованием .....	20
1.4 Исследования процессов распространения пламени с использованием явления электропроводности пламени.....	21
1.5 Обзор и анализ способов снижения выбросов $\text{NO}_x$ в поршневых ДВС с искровым зажиганием при применении альтернативных топлив .....	26
Глава 2 Экспериментальное оборудование и методика проведения экспериментов .....	37
2.1 Экспериментальная установка .....	38
2.2 Методика проведения эксперимента.....	51
Глава 3. Обработка результатов испытания .....	63
3.1 Концентрация оксида азота в отработавших газах.....	64
3.2 Изменение видимой средней скорости распространения пламени по составу газовой смеси при изменении физико-химического состава топлива ...	66
3.3 Анализ распространения пламени с видимой средней скоростью в основной фазе сгорания в зависимости от состава смеси с добавкой газообразного водорода в бензовоздушную смесь .....	73
3.4 Сравнение скоростей распространения пламени при добавке водорода в метановоздушную и бензовоздушную смесь.....	76

3.5 Модель сгорания топливно-воздушной смеси, однородной по составу и фазе, в поршневом двигателе с искровым зажиганием при добавке химического активатора горения (водорода .....	77
4 Обобщение результатов исследования .....	81
4.2 Методика расчётного определения концентрации оксидов азота в процессе проектирования и доводки тепловых поршневых двигателей.....	86
Заключение .....	89
Список литературы .....	91

## ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрев основные направления развития энергетических установок транспортных средств можно сделать вывод - в подавляющей основе энергетической машиной для всего наземного транспорта являются поршневые двигатели внутреннего сгорания. Поэтому работы по улучшению эффективных показателей и уменьшению токсичных выделений при эксплуатации поршневых двигателей являются актуальными, как прежде, так сейчас, представляя основные задачи для решения в процессе проектирования и доводке двигателей и установок.

Затруднения, возникающие при выполнении требований вновь вводимых экологических норм по отработавшим газам для поршневых энергетических установок с применением искрового зажигания при обеспечении эффективности их работы в настоящее время в основном приходится решать, используя системы и устройства нейтрализации токсичных выделений. Наиболее токсичными веществами в продуктах сгорания тепловых двигателей и установок являются несгоревшие углеводороды (НСН), угарный газ (СО) и окислы азота (NO<sub>x</sub>).

В настоящее время двигатели внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием для выполнения норм токсичности работают при коэффициентах избытка воздуха в диапазоне  $0.98 < \alpha < 1.1$ . Эксплуатация двигателей в этом диапазоне требуется для снижения количества вредных выделений СО и СН, но это способствует увеличению оксидов азота NO<sub>x</sub>.

Азот присутствует в воздухе и топливе. В нефтепродуктах содержится до 5 % азотистых соединений, что по массе азота составляет 0,3-0,6 %. Азот может реагировать в пять различных оксидов: оксид – NO, диоксид – NO<sub>2</sub>, полимеры – тетраоксид, триоксид и пентаоксид, суммарно обозначаемые символом NO<sub>x</sub>. В отработавших газах двигателей около 97 % NO, который сначала в системе выпуска, а далее и в атмосфере окисляется до NO<sub>2</sub>. Оксиды азота разрушающим образом действуют на слизистые оболочки и могут оставаться в легких в виде азотистых кислот.

Степень влияния  $\text{NO}_x$  на организм во много раз сильнее нежели  $\text{CO}$ . К серьезному поражению организма приводит вдыхание концентрации  $\text{NO}_x=0,01$  % в течении 30 минут.

$\text{NO}_x$  сохраняются в окружающей их атмосфере до 3-4 дней и являются исходными продуктами для образования фотохимического смога. Поднимаясь в высшие слои атмосферы, они вызывают каталитическое разрушение озонового слоя планеты. Поэтому исследование и снижение окислов азота является на данный момент актуальной задачей.

## **Глава 1 Критический анализ опубликованных материалов по теме диссертации. Формулировка цели и задач исследования**

Как известно уже длительное время тепловые двигатели и установки, в которых реализуется процесс сгорания топлива сохраняют свою подавляющую роль в загрязнении токсичными выделениями продуктов сгорания окружающую среду. Основная часть таких выделений, порядка 70% [1], приходится на поршневые двигатели с искровым зажиганием. Газохроматический анализ ОГ [2] «показал более 200 органических компонентов. Основными токсичными компонентами в ОГ являются оксиды углерода ( $\text{CO}$ ), несгоревшие углеводороды ( $\text{CH}$ ) и оксиды азота ( $\text{NO}_x$ )» [2]. «Отдельную группу составляют канцерогенные ароматические углеводороды, в их числе наибольшую опасность представляет бенз( $\alpha$ )пирен, который является, своего рода, индикатором нахождения канцерогенов в ОГ» [3]. Ужесточение законодательных норм токсичности (Euro-4, Euro-5) требует как нахождения путей совершенствования, так и принципиально нового подхода к вопросам снижения» [2] загрязняющих веществ в отработавших газах двигателя.

### **1.1 Механизм образования и разложения $\text{NO}_x$ при сгорании топливно-воздушных смесей**

Оксиды азота образуются при сгорании ТВС. «В ОГ по оксидам азота в основном наблюдаются окись азота NO и двуокись азота NO<sub>2</sub>. В литературе их принято обозначать условным символом NO<sub>x</sub>.

Различают четыре механизма образования NO<sub>x</sub> в процессе сгорания:

«- термический механизм образования NO<sub>x</sub> [4] обусловлен высокими температурами ( $\geq 2000^\circ\text{K}$ ) присущих пламени, где реакции окисления азота атмосферным кислородом идут в зоне продуктов сгорания. NO<sub>x</sub> образованные при высоких градиентах температур называются термическими

«- «механизм образования «быстрых» NO в процессе сгорания [5,6,7] происходит в начале зоны горения ламинарного пламени (или в корне турбулентного факела) за малый промежуток времени. При этом характерно наличие сверхравновесных концентрации O, H и OH » [7];

- «третий механизм образования NO<sub>x</sub> имеет место в случае нахождения азотосодержащих соединений в топливе [6,7]. Так, например сырая нефть и уголь содержат большое количество азотных органических соединений. При этом азот высвобождается при относительно низких температурах (1100 - 1275°K Такие NO<sub>x</sub> называются топливными)» [6];

- образование NO<sub>x</sub> из закиси азота [5].

Общепринятой теорией образования NO<sub>x</sub> из атмосферного кислорода и азота в процессе сгорания считается термическая теория, предложенная Я.Б. Зельдовичем [4].

Основные положения данной теории [4]:

«- процесс окисления азота атмосферным кислородом осуществляется в зоне продуктов сгорания, т.е. за фронтом пламени;

- выделение NO<sub>x</sub> целиком и полностью определяется максимальной температурой сгорания, концентрацией азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химического состава топлива при условии, если само топливо не содержит азота;

- скорость охлаждения продуктов сгорания существенно влияет на выделение» [4]  $\text{NO}_x$ ;
- в обеднённых топливно-воздушных смесях образование  $\text{NO}_x$  обуславливается максимумом температуры продуктов сгорания. В смесях же обогащенных топливом «выделение  $\text{NO}_x$  определяется не величиной максимальной температуры, а протеканием кинетики разложения;
- выделение  $\text{NO}_x$  при максимальной температуре в процессе сгорания не превышает равновесную концентрацию» [4] ;
- на выход  $\text{NO}_x$  существенное влияние оказывает неравномерность, с которой происходит распределение температуры в объёме завершения горения ( Махе-эффект) при сгорании смесей с коэффициентом воздуха, превышающим единицу. В области богатой смеси воздействие Махе-эффекта заметно снижается.

При изучении зависимости концентрации  $\text{NO}$  от коэффициента избытка воздуха при горении смесей газов водорода,  $\text{H}_2$ , оксида углерода,  $\text{CO}$ , метана,  $\text{CH}_4$  с  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$  [4] экспериментально определено, что возрастание температуры продуктов сгорания вызывает рост концентрации  $\text{NO}$  пропорционально  $\sqrt{N_2 \cdot O_2}$ , и обуславливает связь отношения  $\frac{\text{NO}}{\sqrt{N_2 \cdot O_2}}$  с тепловой и химической энергией смеси. Этими результатами подтверждается механизм термической природы образования  $\text{NO}_x$ .

Образование  $\text{NO}_x$  при горении бедных ТВС и близких к стехиометрическому составу происходят по цепному механизму согласно основным реакциям предложенных «Зельдовичем:



Скорость образования  $\text{NO}_x$  определяется эндотермической реакцией (1.2). Потребление атомарного кислорода в реакции (1.2) восполняется его образованием в реакции (1.3), за счет того, что атом азота, который образуется в реакции (1.2), мгновенно взаимодействует с молекулой кислорода. В

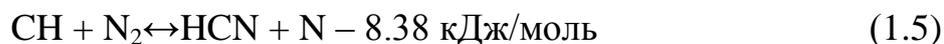
результате этого процесса происходит восстановление активного атома кислорода [8]. Реакции (1.2) и (1.3) протекают как в прямом, так и в обратном направлении. В соответствии с законом Аррениуса, константы скорости прямой и обратной реакций зависят от температуры реакции горения. Реакция (1.2) из-за сильной тройной связи в молекуле  $N_2$ , имеет очень высокую энергию активации. Поэтому она протекает достаточно быстро только при высоких температурах »[8]. В [5] предложено выражение, определяющее изменение концентрации  $NO_x$  по времени. Это выражение предназначено для выявления способов уменьшения выбросов  $NO_x$ , которое можно обеспечить или путём уменьшения концентрации  $[O]$  и  $[N_2]$ , или при уменьшении константы протекания реакции  $k_1$ , например, за счёт снижения температуры.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1 [N_2] \quad (1.4)$$

#### Механизм «быстрого» образования» [1]

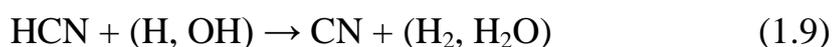
NO в своих работах о плоском углеводородном пламени предложил Fenimore [9]. Название «быстрые» NO обусловлено выявлением появления неравновесной концентрации оксида азота при высокой скорости и короточным временем их образования непосредственно в пределах фронта пламени. Механизм образования таких оксидов азота коренным образом отличается от того, который предложил Я.Б. Зельдович. Расчеты по механизму Я.Б. Зельдовича для сгорания  $CH_4$  при коэффициенте избытка воздуха, равном единице, показывают, что получение равновесной концентрации NO требует времени в пределах приблизительно  $10^{-2} - 10^{-3}$  с, при том, что процесс горения требует  $10^{-4}$  с. Однако в экспериментах при сгорании углеводородно-воздушной смеси в зоне горения была зарегистрирована аномально высокая концентрация NO.

Фенимором ( Fenimore) предложено рассматривать следующие реакции в качестве механизма образования «быстрых» NO:



Т. Miachi [9] показана важнейшая роль при образовании в зоне горения быстрых оксидов азота принадлежит радикалу  $\text{CH}_2$ .

Коллективом Харриса (P. Harris) [5] при исследовании горения газовой смеси  $\text{CH}_4 - \text{O}_2 - \text{N}_2$  экспериментально была зафиксирована сверхравновесная концентрация гидроксила  $\text{OH}$  не в зоне горения а сразу за ней. С учётом этих результатов была разработана схема для пояснения образования  $\text{NO}$  в зоне горения в следующем виде:



В работах [5,6,7] по изучению «быстрых»  $\text{NO}$ , обнаруженных в пламени смеси газов  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$  с кислородом и азотом сформулированы следующие причины образования быстрых оксидов азота в пламени :

- малое время протекания процесса, из-за чего область образования «быстрых»  $\text{NO}$  локализована на ограниченном участке у передней границы нормального фронта пламени;
- определяющим для данных  $\text{NO}$  является коэффициент избытка воздуха. Образование быстрых  $\text{NO}$  происходит вблизи передней границы зоны горения при температуре около  $1000^\circ\text{K}$ .
- Само протекание процесса горения не оказывает существенного влияния на выделение «быстрых»  $\text{NO}$  [7].

В процессе сгорания топлива, содержащего азотосодержащие составляющие происходит образование так называемых топливных  $\text{NO}_x$ . Концентрация азота в топливе определяется его природой: асфальтеновые фракции топлив содержат азот до 2,3% по массе, тяжелые топлива до 1,4% по массе. В сырой нефти может содержаться около 0,65% по массе. Массовое содержание азота в угле находится в пределах от 1 до 2%.

Содержание топливных  $\text{NO}_x$  в пределах зоны горения превышает расчетные равновесные значения. В объеме продуктов сгорания это содержание снижается, причём медленнее при коэффициенте избытка воздуха,  $\alpha > 1$  и более быстрыми темпами при  $\alpha < 1$  [6].

В одной из работ Вольфрума (Wolfrum) [5] показано, как источником образования  $\text{NO}_x$  может служить закись азота  $\text{N}_2\text{O}$ . Предложенный механизм адекватен термическому, в котором образование молекулы  $\text{N}_2\text{O}$  происходит при взаимодействии с третьей частицей М. Такая реакция при участии закиси азота определяется выражением:



Предложенный механизм развит в исследованиях Malte и Platt [5]. Они предложили схему, в которой молекула  $\text{N}_2\text{O}$  вступает в реакцию с кислородом без участия третьей частицы с образованием  $\text{NO}$ :



Так как эта реакция оказывает пренебрежительно малое влияние на выход  $\text{NO}_x$ , то в общем балансе она не учитывается.

Выделение термических  $\text{NO}_x$ , в общем балансе выхода оксидов азота играет доминирующую роль - их содержание при  $T = 2000\text{-}3000 \text{ К}$  определяется 90-98 % [5,9,10,11,8,12]. Ещё более снижается содержание других компонентов при дальнейшем повышении температуры..

Особенности работы поршневых ДВС определяют отличия в образовании  $\text{NO}_x$  по сравнению с другими способами преобразования тепловую энергию в механическую с применением сжигания ТВС, которые определяются протеканием процесса горения за короткий промежуток времени (в пределах нескольких миллисекунд), при этом происходит быстрое изменение температуры, давления и объема сгорания.

Результаты, обсуждённые выше, показывают необходимость более подробного анализа особенностей сгорания в поршневом двигателе внутреннего сгорания

## 1.2 Особенности сгорания ТВС в поршневом ДВС с использованием искрового зажигания

Рассмотрение процесса сгорания в камере сгорания ДВС переменного объёма в своей основе опирается на результаты фундаментальных работ по теории горения. Среди основоположников теории горения одними из первых были К.И. Щелкин и Damköhler. В работе [13] Damköhlera рассматривается область крупномасштабной турбулентности, где интенсивность турбулентности незначительна и область мелкомасштабной турбулентности, где интенсивность турбулентности выше малой. Дамкёллер считал, что в пламени присутствуют и взаимодействуют между собой обе зоны.

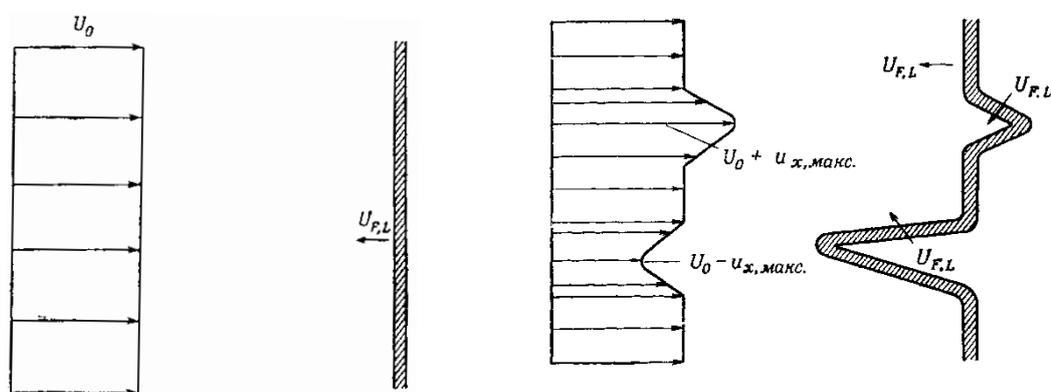


Рисунок 1.1- Схема ламинарного и турбулентного пламени по Damköhlerу

Для камер сгорания ДВС, как считает ряд исследователей, предпочтение отдаётся крупномасштабной турбулентности. При крупномасштабной турбулентности и малой интенсивности происходит искривление фронта пламени. При этом искривлённый ламинарный фронт пламени остаётся сплошным без разрывов.

На рисунке 1.1 схематично представлен фронт пламени рассматриваемый Damköhlerом.

Распространению плоского ламинарного пламени соответствует постоянная скорость  $U_0 = U_n$  (нормальная скорость распространения пламени). При появлении в потоке турбулентных возмущений возникают отклонения от

средней величины скорости  $u_x$  и скорость в ряде зон увеличивается до  $U_0 + u_x$ , и искривлением поверхности фронта пламени с появлением конусообразных язычков, схожих с бунзеновским пламенем. Каждый из язычков распространяется с ламинарной скоростью распространения пламени. Перемещение пламени против потока происходит в зонах пламени со скоростью, равной  $U_0 - u_x$ . В рассматриваемом процессе происходит увеличение поверхности пламени, сопровождаемое ростом пространственной скорости турбулентного распространения пламени.

Проведенный анализ позволил Damköhlery сформулировать новые для своего времени положения:

- в зонах фронта пламени с отрицательными отклонениями от среднего значения скорости распространения пламени ожидаются возмущения больших значений.
- для изменения обратного движения с отрицательной составляющей, скорость ТВС должна превышать  $U_0 + u_x$ .
- образование искривлённого фронта пламени происходит при воздействии турбулентных пульсаций на скорость потока.

Следует отметить, что Damköhler первым включил параметры мелкомасштабной турбулентности с большой интенсивностью в теорию горения, обосновывая интенсивность переноса внутри фронта пламени следствием его пульсаций. Среднюю скорость распространения турбулентного пламени Damköhler предложил определить следующим выражением:

$$U_T = U_H \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (1.16)$$

где  $U_H$  – нормальная скорость пламени;  $\varepsilon$  – коэффициент турбулентного обмена;  $\nu$  – кинетическая вязкость среды.

Damköhler показал, что в уравнении (1.16) существует прямая зависимость между турбулентной и нормальной скоростью пламени и  $U_T$  возрастает с увеличением пульсационной скорости  $U'$ , которая входит в  $\epsilon$ .

Большой вклад в развитие теории распространения турбулентного пламени принадлежит Карловитцу (Karlowitz) [13]. была предложена Karlowitz Проведенные Исследуя структуру турбулентного пламени при крупномасштабной турбулентности, обнаружили, что фронт турбулентного пламени в сущности представляет тонкий ламинарный фронт пламени, который постоянно меняет свою форму, пульсируя как одно целое. Karlowitz выявил, что турбулентная скорость распространения пламени является результатом взаимодействия нормальной скорости распространения пламени, которая характеризует перемещение фронта пламени по свежей ТВС и наложением на этот фронт хаотичного пульсационного движения турбулентных молей газа. Из этого следует предположение о приемлемости применения теории нормального фронта пламени конечной ширины к описанию процессов формирования поверхности и выгорания ТВС в пламени турбулентного потока.

Рассмотренное предложение выражено неравенством:

$$\frac{S_{\phi}}{V_{см}} < \frac{C_p \rho U_H}{\lambda} \quad (1.17)$$

где  $S_{\phi}$  – поверхность фронта пламени;  $V_{см}$  – объем свежей смеси;  $C_p$  – теплоемкость смеси;  $\rho$  – плотность смеси;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Karlowitz процесс развития крупномасштабной турбулентности в потоке разделил на три стадии и предложил для каждой из них следующие выражения для скорости распространения турбулентного пламени:

- для слабой турбулентности ( $\frac{U'}{U_H} \ll 1$ )

$$U_T = U_H + U' \quad (1.18)$$

- для умеренной турбулентности ( $\frac{U'}{U_H} \approx 1$ )

$$U_T = U_H + \sqrt{2U_H U'} + \left[ 1 - \frac{U_H}{U'} \left( 1 - e^{-\frac{U'}{U_H}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.19)$$

- для высокого уровня турбулентности ( $\frac{U'}{U_H} \gg 1$ )

$$U_T = U_H + \sqrt{2U_H U'} \quad (1.20)$$

В итоге, в соответствии с теорией распространения турбулентного пламени по Карловитцу (Karlowitz) распространение турбулентного пламени, независимо от уровня турбулентности потока ТВС, определяется нормальной скоростью распространения ламинарного пламени, являющейся фундаментальной величиной в теории горения.

Современные представления о протекании процесса сгорания в

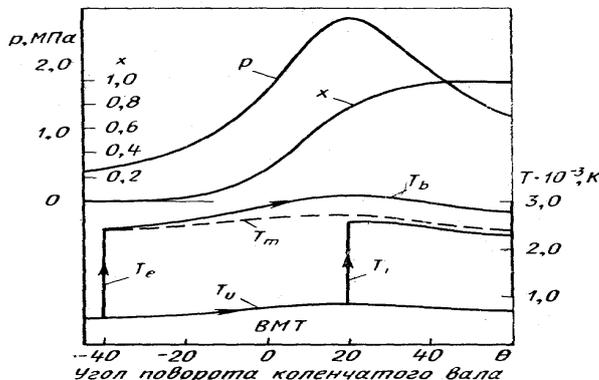


Рисунок 1.2 - Основные параметры процесса сгорания при изменении угла поворота коленчатого вала

пространстве камеры сгорания переменного объема поршневого ДВС основаны на экспериментальных и теоретических работах таких ученых как Д.Д. Брозе, А.Н. Воинов, А.С. Дубовик, Н.В. Иноземцев, А.С. Соколик, Б.С. Стечкин, Л.Н. Хитрин, К.И. Щелкин, W.A. Daniel, J.B.

Neuwood, S. Curry.

На рисунке 1.2 представлен изменение параметров процесса сгорания в поршневом бензиновом ДВС [6]. Верхняя кривая отражает изменение давления при сгорании ( $p$ ) внутри цилиндра при изменении угла поворота коленчатого вала,  $\theta$ , кривая ( $x$ ) - сгоревшую массовую долю ТВС, угол опережения

зажигания, УОЗ,  $\theta_3 = 40^\circ$  пкв. Процесс сгорания заканчивается при положении, пкв  $\theta \approx 30^\circ$  после ВМТ. Как следствие ограниченности промежутка времени, в течение которого завершается сгорание ТВС, проявляются различные изменения температуры во времени по объёмам КС, в которых смесь сгорает в разные промежутки времени. Для понимания характера распределения поля температуры разработана модель негомогенности ТВС, в которой отсутствует процесс смешения при формировании процесса сгорания. В этой модели каждый по очереди отдельно сгорающий газообразный объём ТВС горит при постоянных в данном объёме, но отличающихся в других энтальпии и давлении. В модели принято, что сжатие каждого выделенного газообразного объёма ТВС производится изоэнтропически. Сгорание последнего объёма ТВС происходит при движении поршня вниз, в процессе расширения.

В соответствии с этой моделью на рисунке 1.2 показано состояние температуры, определенное для двух объёмов газа, продуктов сгорания и свежей смеси по углу пкв, по указанной модели. Первый газообразный объём сгорает в начале процесса сгорания, следующий сгорает позднее (линия  $T_1$ ). На этом рисунке обозначение средней температуры продуктов сгорания  $T_m$ , Для несгоревшей смеси обозначение температуры, соответствующей процессу изоэнтропического сжатия  $T_u$ . Необходимо отметить наличие заметного градиента температуры, а также превышение значения максимальной температуры ТВС, сгорающей раньше, над температурой объёма, сгорающего после него. Это превышение составляет приблизительно 500 К. Так как концентрация оксидов азота от температуры зависит экспоненциально, то такое различие в температуре может во много раз изменить количество выделения  $NO_x$ .

Исследования, представленные в публикациях [14, 15, 16, 17, 18], показали соответствие турбулентного горения условиям распространения пламени в поршневых ДВС. Но сложность этих процессов не позволяет однозначно охарактеризовать протекание процесса сгорания на всём его

протяжении. В связи с этим общепринято выделять в процессе сгорания три фазы [19]:

первая фаза – начальная, в этой фаз происходит воспламенение горючей смеси с последующим формированием у свечи зажигания устойчивого факела пламени. Протяжённость первой фазы по времени начинается от подачи высоковольтного напряжения на электроды свечи зажигания до появления отрыва линии давления сгорания от линии изотермического сжатия. Определяется с помощью индикаторной диаграммы, имеет зависимость от физико-химических свойств ТВС и режимных параметров работы двигателя;

вторая фаза – основная, в ней устойчивый факел турбулентного с высокой скоростью перемещается через весь объем камеры сгорания. В конце второй фазы в камере сгорания достигается максимальное давление рабочего тела. третья фаза – завершающая, в которой заканчивается процесс сгорания, сопровождаемый догоранием отдельных турбулентных объёмов, в основном у стенок цилиндра. В завершающей фазе сохраняется максимальная температура в цилиндре и продолжается снижение давления.

Многие современные представления о характере протекания процесса сгорания в поршневом ДВС основаны на результатах исследований А.С. Соколика [19]. Он, одним из первых, провёл эксперименты по исследованию процесса сгорания с регистрацией распространения пламени при помощи скоростной киносъёмки через систему щелей, выполненных в головке цилиндра. Обработка этих результатов показана на рисунке 1.3. Представлены результаты экспериментального определения величин видимой скорости распространения фронта пламени  $U_{пл}$  и выгоревшего объема смеси  $V$  по углу поворота коленчатого вала  $\varphi$  (° ПКВ) с определённым шагом по углу поворота.

Частота вращения коленчатого вала при проведении экспериментов составляла  $n = 400-1600 \text{ мин}^{-1}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 6-10$ , состав ТВС  $\alpha = 0.6 - 1.3$ .

В указанных условиях проведения эксперимента величина максимального значения скорости распространения пламени достигается вблизи верхней мёртвой точки (ВМТ) и составляет  $U_{пл} \approx 16$  м/с. Линия, отражающая долю выгоревшего объема (в процентах), в конце первой и начале второй фазы интенсивно растет, далее, во второй фазе она подрастает с постоянной скоростью и при завершении сгорания наблюдается участок замедления. Протяжённость участка по углу пкв  $\Theta_1$  Соколик определил в качестве начальной фазы сгорания. Основная фаза это протяжённость участка по углу пкв  $\Theta_2$ , соответствует линейному участку зависимости  $V$ , где

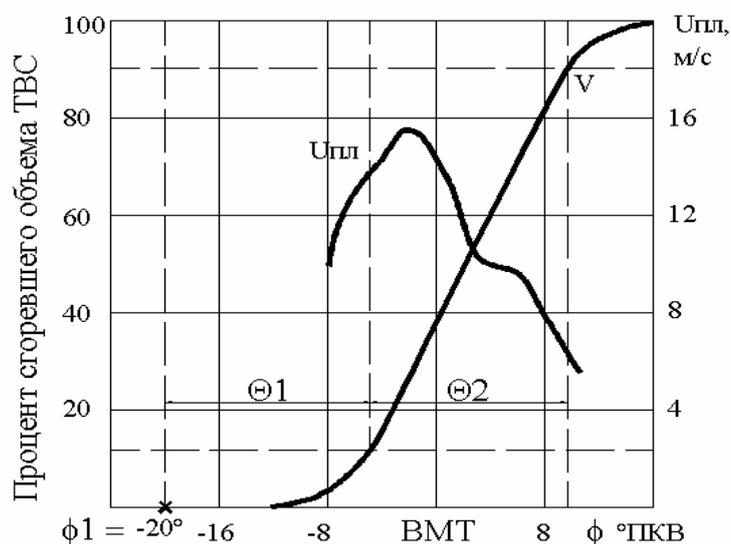


Рисунок 1.3 – Зависимость видимой скорости распространения пламени и доли выгоревшего объема ТВС по углу поворота коленчатого вала по экспериментам Соколика доля сгоревшей ТВС вырастает от ~ 13 до 90%. Тот участок угла поворота КВ, на котором доля сгоревшего топлива  $V$  вырастает от 90 до 100%, составляет заключительную фазу сгорания.

Проводя анализ протекания процессов по фазам сгорания, А.С. Соколик [19] обращает внимание на то, что в одной фазе проявляется влияние только скоростного режима, то есть завихрения заряда, а в другой – только физико-химических свойств топливовоздушной смеси. И турбулентный и физико-химические факторы оказывают влияние на каждую из фаз процесса сгорания,

но механизм воздействия этих факторов на сгорание различен и соответственно различны и количественные зависимости” [19].

Там же им установлена определяющая роль процесса распространения пламени в протекании сгорания ТВС в двигателях с искровым зажиганием. Им, впервые, высказано предположение, что формирование устойчивого объема пламени и его распространение по всей КС начинается в форме ламинарного пламени при наличии мелкомасштабной турбулентности, затем переходит в стадию турбулентного горения, заканчивается сгорание у стенок цилиндра имеет характер, близкий к ламинарному.

По известным данным [13,14,15,18,19,20] «процесс сгорания в начальной фазе в основном определяется мелкомасштабным турбулентным горением, т.е. горением, турбулентность которого мала по сравнению с шириной зоны нормального пламени и ее роль сводится к сокращению ширины зоны горения. Помимо этого мелкомасштабная турбулентность увеличивает перенос теплоты и вещества внутри зоны горения, способствует увеличению нормальной скорости распространения фронта пламени. Следствием выше сказанного является разделение всего процесса сгорания на отдельные фазы, отличающиеся механизмом воздействия турбулентности» [19]. В своей работе [21] К.И. Щелкин отмечает: “вполне законно выделить начальную фазу горения в двигателе как фазу, в которой формируется фронт турбулентного пламени, как фазу, в которой размеры пламени достигают ширины зоны турбулентного горения, и горение качественно отличается от сгорания в следующей фазе” [21]. На основании экспериментальных исследований, по определению момента перехода начальной фазы в основную, авторы [19,21] отмечают, что «процесс перехода происходит при выгорании 10-15% объема ТВС, или в момент отрыва кривой видимого повышения давления на индикаторной диаграмме от кривой сжатия. В начальной фазе скорость распространения фронта пламени близка к скорости ламинарного пламени. Затем, за счет воздействия мелкомасштабной турбулентности, скорость распространения фронта пламени увеличивается.

Скорость мелкомасштабного турбулентного горения зависит от значения нормальной скорости пламени, коэффициентов турбулентной и молекулярной диффузии » [19] и выражается соотношением:

$$U_T \sim U_H \sqrt{1 + \frac{\chi_T}{\chi_M}} \quad (1.21)$$

где  $U_H$  – нормальная скорость пламени,  $\chi_T$  - коэффициент турбулентной диффузии,  $\chi_M$  - коэффициент молекулярной диффузии.

Также отмечается, что интенсивность турбулентного переноса в цилиндре ДВС пропорциональна частоте вращения коленчатого вала, а длительность начальной фазы  $\Theta_1$  (в °пкв) изменяется приблизительно пропорционально  $\sqrt{n}$  и существенно зависит от физико-химических свойств ТВС, степени разбавления ТВС остаточными газами. Указанные исследователи предполагают следующую эмпирическую зависимость определения длительности первой фазы сгорания:

$$\Theta_1 \approx U_H \sqrt{n} \quad (1.22)$$

Скорость распространения фронта пламени в основной фазе полностью подчиняется закономерностям крупномасштабного турбулентного горения »[19]. При этом «масштаб турбулентности значительно больше ширины зоны нормального горения, что способствует увеличению поверхности пламени. Крупномасштабная турбулентность переносит очаг пламени, как единое целое, до того момента, когда он достигает размеров достаточных для дробления. С развитием скорости распространения фронта пламени значение мелкомасштабной турбулентности ослабевает. С этого времени основным и определяющим, при сгорании ТВС, параметром является крупномасштабная турбулентность» [19]. Экспериментальные работы, определили зависимость видимой средней скорости распространения пламени для основной фазы сгорания пропорциональную скоростному режиму работы двигателя.

В [21] представлена теория турбулентного горения, в которой для определения скорости распространения пламени адекватно предложена эмпирическая зависимость, :

$$U_T = U_H \sqrt{1 + B \left( \frac{U'}{U_H} \right)^2} \quad (1.23)$$

где  $U'$  - скорость турбулентных пульсаций в потоке,  $B$  – константа.

Для качественной оценки характера распространения турбулентного пламени предложено упрощенное выражение:

$$U_T \approx U_H + BU' \quad (1.24)$$

Для потока с крупномасштабной турбулентностью

$$U_T \approx U' \quad (1.25)$$

Для потока ТВС с крупномасштабной турбулентностью состав ТВС и частота вращения коленчатого вала оказывают меньшее влияние на длительность второй фазы,  $\Theta_{II}$ . Длительность  $\Theta_{II}$  в этом случае определяется скоростью турбулентных пульсаций [79].

В исследованиях работ [22,23] сформулировано «В заключительной фазе, как и в начальной процесс сгорания протекает по законам мелкомасштабного турбулентного горения, скорость которого существенно зависит от физико-химических свойств ТВС. Возобновляется влияние частоты вращения коленчатого вала. Кроме того, физико-химические свойства ТВС определяют скорость догорания отдельных молей за фронтом пламени. Вблизи стенок камеры сгорания и днища поршня скорости и масштабы турбулентных пульсаций намного меньше, чем в основном объеме, поэтому скорость распространения пламени с приближением к стенкам уменьшается» [22].

В работе [13,19,24,25] указано, что «скорость распространения фронта пламени при мелкомасштабной турбулентности пропорциональна нормальной

скорости распространения пламени. Нормальная скорость в свою очередь зависит от физико – химических свойств ТВС, таким образом

$$U_T \sim U_n, \text{ где } U_n = \sqrt{\frac{a}{t_p}} \quad (1.26)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $t_p$  – время сгорания ТВС в ламинарном фронте пламени.

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho} = \frac{\lambda RT}{C_p \rho} \quad (1.27)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $C_p$  – теплоемкость смеси.» [24]

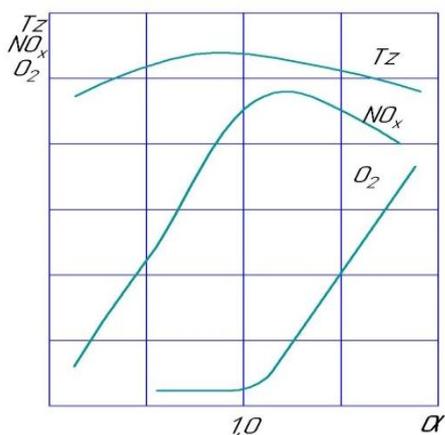
Анализ параметров, входящих в выражения (1.26) и (1,27), показывают пропорциональность нормальной скорости распространения пламени от значения температуры в процессе сгорания. Температура сгорания так же определяет выход оксидов азота.

Таким образом предполагается, что существуют закономерности, связывающие выделения  $NO_x$  в ОГ и среднюю скорость распространения пламени при сгорании топливно-воздушной смеси в тепловом поршневом двигателе с внешним смесеобразованием.

Особенности, присущие сгоранию топливно-воздушной смеси в поршневом ДВС с внешним смесеобразованием, оказывают определяющее влияние на протекание механизма образования  $NO_x$ .

### **1.3 Особенности механизма образования оксида азота в тепловых поршневых двигателях с внешним смесеобразованием**

Выполнено множество работ [2,8,10,26 и др.], в которых проведены



экспериментальные и теоретические исследования характеристик механизмов образования  $NO_x$  в отработавших газах тепловых поршневых двигателей с внешним смесеобразованием. В этих работах в качестве основного в механизме образования оксидов азота отмечается механизм Я.Б. Зельдовича - образование  $NO$  по термическому механизму.

В этих исследованиях изучалось влияние параметров процессов сгорания и расширения на выделения  $NO_x$  с отработавшими газами.

В работах [23,27] отмечаются многочисленные сложности, возникающие при проведении исследований, связанные с изменением объема камеры сгорания при возвратно поступательном перемещении поршня, относительной неомогенностью топливно-воздушной смеси, диссоциацией оксида азота в процессе расширения. Так же сказывается неравномерность при распределении ТВС в цилиндрах и межцикловая неравномерность. В особенности отличаются сложности, оказываемые процессом сгорания, в котором изменение

Рисунок 1.4 - Распределение температуры сгорания  $T_z$ , кислорода  $O_2$  и выделений  $NO_x$  в зависимости от состава ТВС

температуры происходит за короткий промежуток времени от температуры в момент зажигания до максимального значения при завершении сгорания.

Определяющее влияние на выход в ОГ  $NO_x$ , в поршневых ДВС с искровым зажиганием, оказывает состав ТВС [6,28,29,30]. На рисунке 1.4 представлена характерная зависимость выхода  $NO_x$  от состава ТВС. «Выделение  $NO_x$  имеет максимальное значение в области смесей  $\alpha = 1,05 - 1,1$ . При таких составах ТВС помимо очень высокой температуры цикла, концентрация свободного кислорода оптимальна для ускорения скорости реакции окисления азота. С обогащением состава ТВС температура сгорания имеет большее численное значение из-за увеличения количества полученной за цикл теплоты, однако, содержание свободного

кислорода падает, что приводит к снижению выделений  $\text{NO}_x$  двигателем. При обеднении  $\alpha > 1,1$  в смеси наблюдается избыток свободного кислорода, однако количество выделяющейся теплоты уменьшается и в результате снижение температуры цикла определяет меньший выход  $\text{NO}_x$ » [6]

По работам [11,26,29,31] известно, что «при максимальной температуре цикла в бензиновых ДВС ( $T_Z = 2500\text{-}2800^\circ\text{K}$ ) из всех оксидов азота образуются только  $\text{NO}$ . В ОГ поршневых ДВС их доля составляет 99% от всех  $\text{NO}_x$ » [11]. В работах [11,32], говорится о том, что «в цилиндре поршневых ДВС происходит «закалка»  $\text{NO}_x$  при максимальной концентрации, кроме горения обогащенных ТВС. Из этого следует, что во время расширения и выпуска концентрация  $\text{NO}_x$  остается практически постоянной, близкой к условиям максимальной температуры цикла» [11].

Из-за того, что механизм окисления азота имеет под собой, в основном, термическую природу, то наиболее общими факторами, действующими в поршневых двигателях, что сильно влияют на изменения температуры, есть сжатие, расширение и Мах-эффект.

Экспериментально подтверждено влияние степени сжатия на уровень начальной температуры на воспламенение ТВС и процесс сгорания. Но это влияние, проявляющееся в увеличении температуры примерно до  $1000^\circ\text{K}$ , существенно для протекания предпламенных реакций, но такой уровень температуры не обеспечивает условия для протекания реакций по образованию термических  $\text{NO}_x$ .

Постоянное нарастание давления в цилиндре при распространении фронта пламени ведет к тому, что в «различных частях КС наблюдается разность в температурах, до  $500^\circ\text{K}$  [8] вследствие Махе-эффекта, а изменение объёма, в сторону увеличения, отражается на скорости охлаждения продуктов сгорания»[8]. В работах [4,8] отмечается, что «Махе-эффект существенно увеличивает среднюю скорость реакции окисления азота из-за большой энергии активации образования  $\text{NO}_x$  даже в случае постоянной средней температуры продуктов реакции в КС двигателя. Анализируя параметр, характеризующий

скорость протекания реакции образования  $\text{NO}_x$ , т.е. зависимость времени при котором достигается равновесное количество  $\text{NO}_x$  от температуры сгорания ТВС, он же отмечает уменьшение времени реакции образования  $\text{NO}_x$  от 1с при температуре 2000 К,  $3.1 \cdot 10^{-3}$ с при 2300 К,  $2.2 \cdot 10^{-7}$ с при 2600 К и до  $72 \cdot 10^{-7}$ с при »[8]температуре 4000 К.

В работе [8] автор отмечает «данные времени образования максимальной концентрации  $\text{NO}_x$  при процессе горения ТВС  $\alpha < 1$  равном  $6 \cdot 10^{-4}$ с, а при смесях  $\alpha > 1$  -  $2,5 \cdot 10^{-2}$ с. При частоте вращения вала от 1500 до 5000  $\text{мин}^{-1}$  образование наибольшей концентрации по углу поворота коленчатого вала составляет от 5 до  $18^\circ$ пкв. В связи с тем, что основная фаза процесса сгорания составляет  $40 \div 60^\circ$ пкв, то при бедных ТВС процесс расширения будет «обрывать» реакцию образования  $\text{NO}_x$ .

При богатых ТВС процесс расширения становится, заметен некоторым ускорением замораживания при максимальной концентрации  $\text{NO}_x$ , увеличивая тем самым его количество » [8] в отработавших газах. В работе [8] описывается результаты наблюдений, проведенных с помощью стробоскопического газоотбора, где «время образования основного количества  $\text{NO}_x$  составляет от  $2,2 \cdot 10^{-3}$  до  $6,2 \cdot 10^{-3}$ с.

В бензиновых поршневых ДВС, где сгорает предварительно перемешанная ТВС,  $\text{NO}_x$  образуются во всем объеме КС, вследствие того, что рабочий заряд, а, следовательно, и зона продуктов сгорания занимают весь объем КС» [8].

При анализе результатов исследования, представленных в данном разделе, становится ясной определяющая роль особенностей процесса сгорания в образовании  $\text{NO}_x$  в тепловом поршневом двигателе с искровым зажиганием, а именно: возрастание в короткий промежуток времени значения температуры от температуры воспламенения до максимального значения при завершении сгорания, изменения объема сгорания при возвратно поступательном перемещении поршня, времени пребывания азота и кислорода в зоне продуктов

сгорания. Отсюда следует, что характеристики образования  $\text{NO}_x$  в отработавших газах следует исследовать и анализировать в совместно с параметрами, определяющими процесс распространения пламени в двигателе.

#### 1.4 Исследования процессов распространения пламени с использованием явления электропроводности пламени

Наиболее глубокие понятия об интенсивности протекания реакций горения во фронте пламени КС поршневых двигателей, а по этим характеристикам и о количестве  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HCN}$  и  $\text{CO}$  в отработавших газах получены с помощью явления электропроводности пламени, обусловленной химической ионизацией (хемионизацией), пламени углеводородного топлива [36, 37]. В процессе хемионизации в пламени происходит образование электрически заряженных частиц (положительно и отрицательно заряженные ионы и электроны) в результате химических реакций горения. В продуктах сгорания при высокой температуре может происходить термическая ионизация (термоионизация), рисунок 1.3.5.

Winkler, L. Ion current measurements in natural gas flames / L. Winkler, N. Hegman, C. Raffay, A. Palotas // European combustion meeting. – 2007.

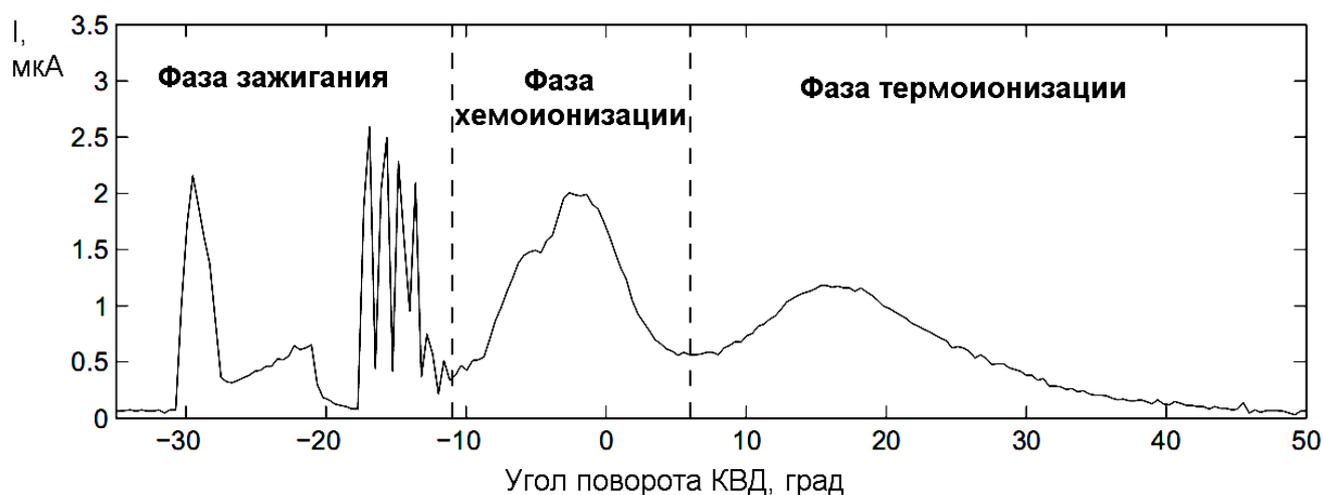
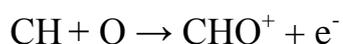


Рисунок 1.4.1 – Осциллограмма записи ионного тока при сгорании ТВС в поршневом двигателе.

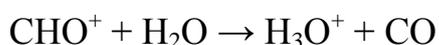
В пламени для разных видов топлива могут существовать различные виды механизма ионизации. В пламени углеводородного топлива в основном проявляет себя хемоионизация, особенно в бедной по составу смеси.

При хемоионизации экзотермические стадии реакции, протекающие с участием возбужденных молекул (атомов) или свободных радикалов, выделяют энергию, достаточную для появления ионизации, которая протекает при образовании пары ион - электрон.

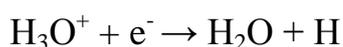
Основная реакция, обуславливающая ионизацию в пламени углеводородного топлива, имеет вид:



«Образование первичного иона  $\text{CHO}^+$  в результате ионно-молекулярных реакций перезарядки приводит появлению большого числа различных ионов. Масс-спектрометрические исследования ионного состава метановоздушных пламен показали присутствие в пламени до 50-ти сортов положительных ионов, из которых главными, помимо  $\text{CHO}^+$ , являются  $\text{C}_3\text{H}_3^+$  и  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Ион  $\text{H}_3\text{O}^+$ , образуется в результате реакции:



В дальнейшем, ионы  $\text{H}_3\text{O}^+$  вступают с электронами в реакцию диссоциативной рекомбинации:» [36]



Таким образом химическая ионизация во фронте углеводородного пламени обусловлена существованием избыточной неравновесной концентрации активных центров  $\text{CH}$  и  $\text{O}$ , образующихся в результате цепных химических реакций, характерных для зоны горения.

Использование явления химической ионизации позволяет исследовать параметры, определяющие основные характеристики распространения пламени, от которых зависит образование  $\text{NO}$ : скорость распространения пламени (нормальная, турбулентная) и ширина зоны горения. Например, в исследованиях одноцилиндрового, бензинового ДВС была определена связь

между амплитудой напряжения ионного тока и величиной видимой средней скорости распространения пламени (рисунок 1.4.3).

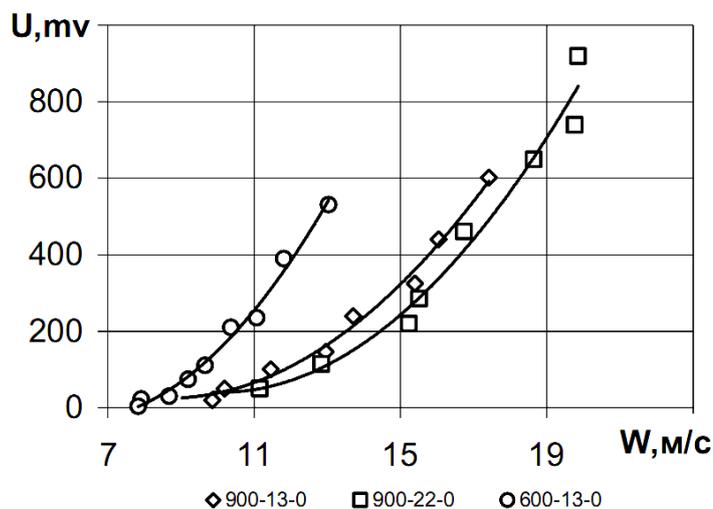


Рисунок 1.4.3 – Взаимосвязь напряжения ионного тока ( $U$ ) и видимой средней скоростью ( $W$ ) распространения пламени.

Результаты анализа протекания процесса хемионизации показывают возможность определения как местных скоростей распространения пламени, так и их направления при установке ионизационных датчиков в пространстве камеры сгорания поршневого ДВС.

### 1.5 Анализ расчетных моделей образования $\text{NO}_x$ в цилиндре поршневого ДВС

Построение моделей образования вредных компонентов, заключается в рассмотрении существующих понятий о характеристиках протекания химических реакций в процессах превращения свежей ТВС в отработавшие газы и разработке математического аппарата для количественного определения конечных продуктов. Математический аппарат модели должен, по возможности, соответствовать возможностям вычислительной техники и адекватно отражать физику процессов, протекающих в камере сгорания. Одной из основных целей создания математических моделей представляется возможность определения направления дальнейших исследований механизмов

образования токсичных выделений и методов борьбы с ними. По большинству математических моделей нет возможности рассчитать реальное количество вредных выделений. Но их использование даёт возможность предсказания путей изменения выбросов токсичных веществ при определённом воздействии на рабочие параметр

. Эксперименты являются основой теоретических моделей образовании токсичных ОГ.

Коллективом авторов [11] представлена разработка математической модели, описывающей рабочий процесс двигателя с внешним смесеобразованием. При использовании этой модели можно определять и эффективные показатели работы двигателя, и оценивать количество вредных выделений в отработавших газах, учитывая кинетику химических реакций при их образовании и некоторую гетерогенность топливной смеси.

Основными положениями, на которых основана разработка представляемой модели являются следующие:

«- КС разделена на несколько зон;

- каждая зона имеет свой состав смеси  $\alpha_i$  в зависимости от среднего  $\alpha$  по цилиндру и его среднеквадратичного отклзеоонения (принимается нормальный закон распределения состава ТВС по зонам);

- давление, в данный момент времени, во всех зонах КС одинаково;

- сгорание во всех зонах КС происходит изоэнтальпийно;

- несгоревшая смесь включает в себя воздух, пары топлива и остаточные газы;

- температуру каждого элемента до и после процесса сгорания определяет его политропное сжатие и расширение;

- состав продуктов сгорания в сгоревшем элементе находится из условия термического равновесия при температуре и давлении в зоне в данный момент;

- полное отсутствие перемешивания и теплообмена между элементами;

- прорыва газа через поршневые кольца не происходит;

- количество сгоревшего топлива определяется по заданному закону сгорания.»

[11]

В обсуждении следующей математической модели, несмотря на то, что она может использоваться для определения выделений несгоревших углеводородов и оксида углерода, будут рассматриваться только вопросы, касающиеся выделениям оксида азота.  $\text{NO}_x$ .

Рассматриваемая модель основана на разбиении пространства камеры сгорания на отдельные объёмы. Затем производят расчетные операции для  $\text{NO}_x$ , образующихся в соответствии с термическим механизмом Зельдовича, используя уравнения цепных реакций в каждом объёме. В заключение определяют среднюю концентрацию оксида азота по объёму камеры сгорания. Предлагаемая модель позволяет проводить оценку влияния некоторой гетерогенности топливной смеси на выделение  $\text{NO}_x$ , так как указанный параметр является существенным в отношении влияния на протекание рабочего процесса, значения локальной температуры и состава отработавших газов. Учёт незначительной гетерогенности топливной смеси является необходимым при проведении расчетных операций в соответствии с математической моделью образования  $\text{NO}_x$  в объёме сгоревших газов за фронтом пламени. Достоверность разработанной математической модели образования  $\text{NO}_x$  проверена в экспериментальных условиях на двигателях CFR и MeM3-245. Представленная математическая модель достоверно описывает воздействие рассмотренных параметров на выделение  $\text{NO}_x$  в камере сгорания поршневого двигателя с внешним смесеобразованием.

Рассмотрим следующую модель образования  $\text{NO}_x$  [6], основанную на равновесном состоянии связи C-H-O. В этой модели предполагается, что промежуток времени, потребный для обеспечения уровня равновесной концентрации оксида азота в значительной мере превышает время, необходимое при достижении равновесных концентраций остальных вредных выделений в отработавших газах. Концентрация определяемых компонентов и уровень их температуры рассчитываются при использовании равновесных методов, исключая  $\text{NO}_x$ . Результаты расчетов, которые получены с использованием рассматриваемой модели, в сравнении с экспериментальными,

полученными при работе тепловых поршневых двигателей, показывают достаточно хорошее совпадение. Следует отметить наличие больших расхождений результатов расчетов по математической модели и данными экспериментов, полученными в области для перебогащённых смесей в условиях ударной бомбы.

Экспериментальными данными, полученными N.N.Mustafi, Y.C. Miraglia и др. [37] с использованием вместо традиционного топлива (бензина) синтез-газа (52 % CO, 44 % H<sub>2</sub>, 4% N<sub>2</sub>), возрастание выделений NO<sub>x</sub> в отработавших газах почти в три раза в сравнении с работой на бензине. При этом максимальное значение количества NO<sub>x</sub> в отработавших газах при работе на синтез-газе сместилось в обеднённую смесь ( $\alpha=1,25$ ), рисунок 1.5.

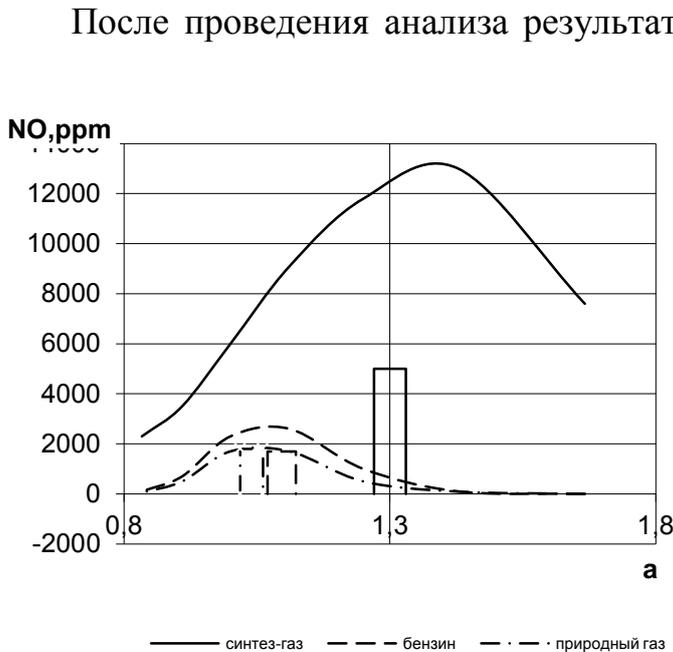


Рисунок 1.5 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных по выделению NO<sub>x</sub> в ОГ при работе ДВС на различных видах топлива. расчетные

заклучению, объясняющее рост концентрации оксида азота в отработавших газах более высоким уровнем скорости с которым пламя распространялось в объёме камеры сгорания. Рост скорости пламени привёл к более высокому значению температуры пламени и, следовательно, продуктов сгорания, что привело к экспоненциальному увеличению количества выделяемого NO<sub>x</sub>.

Авторами [37] с использованием современных методик проведено расчётное определение концентрации оксида азота при использовании бензина, природного газа и синтез газа. Результаты сравнения данных расчета с экспериментальными представлены на рисунке 1.5. Как видно, получено хорошее совпадение для

бензовоздушной смеси и смеси природного газа с воздухом и превышение данных расчета в сравнении с полученными экспериментально практически в три раза для смеси синтез газа с воздухом.

Следует отметить тот факт, что адекватность всех рассмотренных расчетных математических моделей образования  $\text{NO}_x$  главным образом определяется точностью определения концентрации атомарного кислорода, представляющую при рассмотрении процессов горения сложнейшую для решения задачу. При ошибке количественного определения концентрации атомарного кислорода в продуктах сгорания произойдет значительная ошибка и в расчёте выделений оксида азота. В соответствии с термическим механизмом выход  $\text{NO}_x$ , в соответствии с расчетной моделью пропорционален концентрации атомарного кислорода.

По отношению к альтернативным топливам, как показали рассмотренные модели, отсутствует учёт влияния добавления газообразного водорода на образование оксида азота в отработавших газах. Существующие расчетные модели выделения  $\text{NO}_x$  в ОГ не учитывают влияние добавок газообразного водорода.

## **1.5 Обзор и анализ способов снижения выбросов $\text{NO}_x$ в поршневых ДВС с искровым зажиганием при применении альтернативных топлив**

### **1.5.1 Альтернативные топлива.**

Одним из способов снижения выбросов  $\text{NO}_x$  можно считать применение альтернативных видов топлива - водорода, синтетических спиртов.

Водород в качестве топлива, несомненно, обладает рядом преимуществ по сравнению с углеводородными топливами. В последнее время все ведущие автомобильные компании всего мира интенсивно работают в направлении по созданию транспорта, работающего на водороде.

Концентрационные пределы воспламеняемости водорода, значительно шире, он хорошо смешивается с воздухом, энергия для воспламенения требуется много меньше, чем для бензовоздушных смесей. При изменении качества топлива, за счет добавки водорода в ТВС меняются не только пределы устойчивого горения, токсичность по  $\text{CH}$ , но и токсичность по  $\text{NO}_x$  [3]. Выделения  $\text{NO}_x$  очень сильно зависят от температуры. Проведенный анализ теоретического цикла на водороде и бензине показал, что на ТВС, близких к стехиометрическим, температура сгорания на водородовоздушной смеси значительно (на  $200^\circ$ ) выше, чем на бензовоздушной смеси. Так в соответствии с [38] при одинаковом составе ТВС добавка водорода в количестве 10 % массового расхода воздуха приводит к увеличению концентрации  $\text{NO}_x$  в ОГ от 20 до 30 %.

Между тем, ряд авторов [11] утверждают, что в связи с тем, что концентрация  $\text{NO}_x$  является функцией от температуры, максимальная температура цикла при работе ДВС существенно снижается по данным при составе водородовоздушной смеси или в смеси с бензином  $\alpha > 1,2$ , а по данным [11] при составе водородовоздушной смеси  $\alpha > 2$ . Разброс данных относительно большой, но все это говорит о том, что существенное снижение выбросов  $\text{NO}_x$  в ОГ происходит на бедных и сверхбедных ТВС.

В работе [39] приводятся данные где, характер изменения удельных выбросов  $\text{NO}_x$  в зависимости от нагрузки показывает, что в области малых и средних нагрузок вплоть до  $50\% P_e^{\max}$  выделения  $\text{NO}_x$  практически отсутствуют. Этот факт имеет немаловажное значение для двигателей с искровым зажиганием, так как именно указанные области являются приоритетными при работе ДВС в условиях города. Авторы [12] отмечают еще и тот факт, что работа ДВС применительно с водородом устойчива на сверхбедных смесях вплоть до  $\alpha = 6$ .

Одним из способов уменьшения выделений  $\text{NO}_x$  считается снижение максимальной температуры цикла за счет понижения температуры топливовоздушной смеси в процессе впуска до температуры  $-130^\circ\text{C}$  путем

подачи холодного газообразного водорода. В конечном результате это приведет к снижению выделений  $\text{NO}_x$  на порядок и, разумеется, даст прибавку двигателя в мощности около 30% в результате повышения массового наполнения цилиндра. Система работающего на водороде или смеси водорода с бензином ДВС по утверждению авторов [12] имеет ряд недостатков. Вот основные из них:

«- низкие объемные энергетические характеристики из-за малой плотности водорода, вытекают в проблему размещения и хранения его на борту автомобиля. Существует опасность взрыва криогенного бака при механических повреждениях;

- преждевременное воспламенение рабочего заряда;

- возможность обратных вспышек во впускной тракт. В поверхностных слоях металлов при их насыщении имеет место явление называемое «водородной хрупкостью»;

- быстрое нарастание давления в цилиндре из-за высокой скорости сгорания, т.е. жесткость работы;

- дополнительное оборудование и некоторое изменение в системе топливоподачи» [12].

При использовании в качестве моторного топлива синтетических спиртов (метанол, этанол) содержание токсичных веществ снижается. Уменьшение выделений  $\text{NO}_x$  в ОГ обусловлено меньшей максимальной температурой горения спиртов (на  $150^\circ\text{C}$ ) по сравнению с бензином. Основной проблемой при использовании спиртовых топлив является нахождение в ОГ альдегидов. Спиртовые топлива нашли ограниченное применение в ДВС с искровым зажиганием в основном в спортивных автомобилях. Это связано с дороговизной, химической агрессивностью и с существенным изменением систем топливоподачи.

Химические активаторы горения топливно-воздушных смесей

Среди химических активаторов горения в первую очередь рассматривается их влияние на эффективность работы энергетических установок и токсичность отработавших газов по сравнению с широко

применяемыми видами топлива, такими как: бензин, дизельное топливо и природный газ.

### **Водород**

В качестве химического активатора горения углеводородных топлив наиболее широко известен водород, который качественно выделяется от обычных углеводородных топлив такими важнейшими физико-химическими параметрами сгорания как: энергией воспламенения, концентрационными пределами воспламенения и горения и, в особенности, нормальной скоростью распространения пламени.

Выявление особенностей применения водорода в организации процесса сгорания топлив в поршневых тепловых двигателях и установках представляет большой научный и практический интерес. Максимальная нормальная скорость распространения пламени водородовоздушной смеси при прочих равных условиях больше, чем в бензовоздушной почти в семь раз. Концентрационные пределы сгорания водорода в воздухе, коэффициент избытка воздуха изменяется от 0,15 до 10, позволяет переходить к качественному регулированию процессов сжигания топлива в камерах сгорания двигателей и установок.

Важнейшим показателем организации процесса сгорания ТВС является энергия воспламенения. Для осуществления воспламенения водорода она наиболее минимальна, так как задержка воспламенения водородовоздушной смеси практически не зависит от температуры и давления смеси.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что добавление небольшого количества газообразного водорода повышает КПД двигателя и значительно снижает токсичные выбросы ОГ, особенно, при использовании бедной топливно-воздушной смеси. Устойчивый процесс горения, а значит надёжная работа энергетической установки, при обеднении смеси с добавкой водорода обеспечивается увеличением скорости распространения пламени до величин, близким к соответствующим на

стехиометрических смесях. Необходимо отметить существенное расширение пределов устойчивого обеднения смеси. Экспериментально показано, что добавка водорода в количестве 5-6% от расхода топлива обеспечивает устойчивую и стабильную работу двигателя при использовании топливно-воздушных смесей при коэффициентах избытка воздуха, превышающих 1,4.

### **Перекись водорода**

Кроме водорода активирующее действие на горение углеводородных топлив могут оказывать и другие добавки. Среди них можно рассматривать перекись водорода, которая легко разлагается по реакции



где Q – тепловой эффект реакции. Из приведенной формулы видно, что кроме тепла в результате реакции выделяется молекулярный кислород, способный активно дожигать неполные продукты сгорания до конечных. Вода же при определенных условиях может разлагаться на радикалы O и OH, являющимися активными центрами горения.

### **Ацетилен**

Активирующее воздействие на горение углеводородов предположительно может оказывать и ацетилен. Это предположение обосновывается достаточно широкими концентрационными пределами горения ацетилена, высокой температурой сгорания и скоростью распространения фронта пламени, что определяет устойчивость процесса горения.

### **Закись азота**

Аналогичными свойствами обладает и закись азота, отличительным свойством которой, в отличие от озона и в какой-то мере перекиси водорода, устойчивость в свободном состоянии, т.е. способность к длительному хранению.

## Отходы производства химической продукции

Гептановые и спиртосодержащие фракции могут являться химическими активаторами горения, промоторами, из-за присутствия в их составе гидроксильной группы ОН, которая в соответствии с химической кинетикой горения способствует ускорению завершения процесса сгорания.

Из рассмотренных активаторов горения наиболее предпочтительным является водород.

### 1.5.1 Перспективы использования природного газа в качестве топлива для автомобильных двигателей

Сжатый природный газ (СПГ) как альтернативный вид топлива в настоящее время широко доступен потребителям во всём мире. При существующей низкой цене прогнозы по увеличению его использования, в том числе для эксплуатации поршневых двигателей и установок, весьма перспективны. СПГ в ближайшие 20 лет прогнозируется рост его потребления в мире (рисунок 1.4.3).

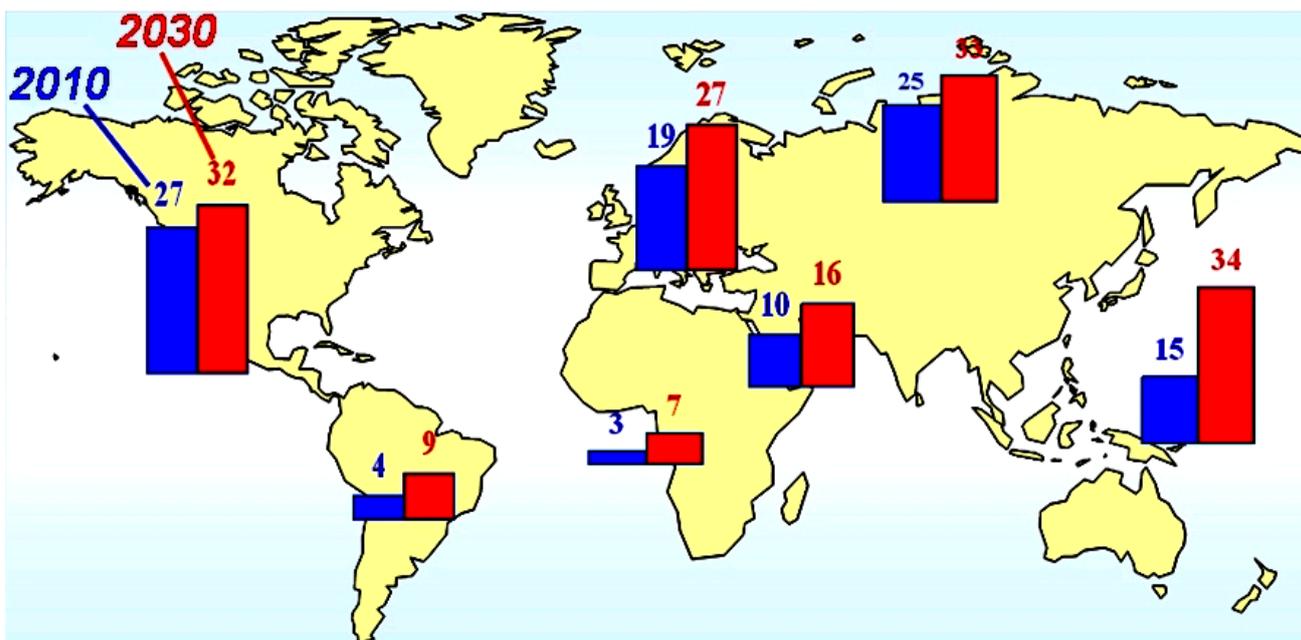


Рисунок 1.4.3 – Распределение потребления СПГ в мире: 2010 и перспективы к 2030 г.г. , в триллионах кубических метров.

Объем потребления метана в качестве автомобильного топлива в РФ в 2010 г. составил порядка 320 млн. куб. м. По данным экспертного опроса, проведенного ООО «Газ-Ойл», в 2013 г. спрос на газобаллонную аппаратуру и оборудование для газозаправочных станций на российском рынке вырастет на 15% относительно 2012 г.. Это связано с тем, что во многих субъектах РФ были приняты меры по стимулированию перевода муниципального автотранспорта на СПГ.

К достоинствам СПГ относятся]: значительные запасы в мире; возможность получения из возобновляемых источников; меньшая токсичность выхлопных газов (рисунок 1.4.4); незначительные конструктивные изменения при конвертации бензиновых ДВС.

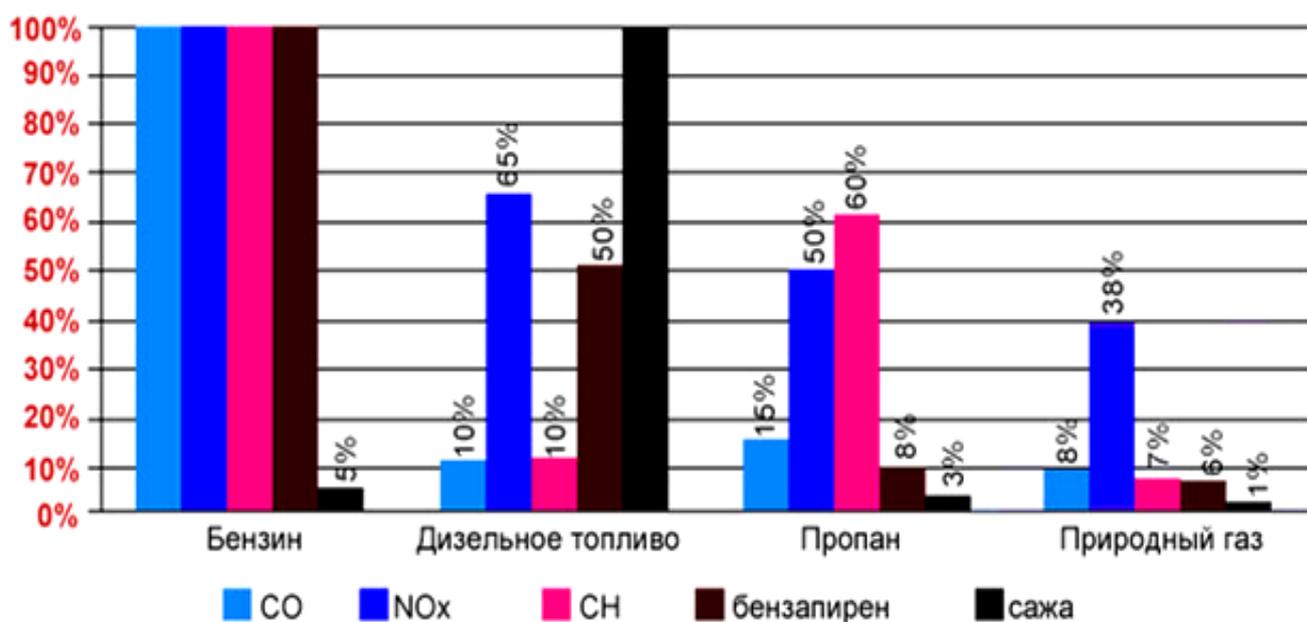


Рисунок 1.4.4 –Содержание вредных выделений в отработавших газах поршневых двигателей

Нормирующие параметры: за 100% принят бензин, а по саже 100% - дизельное топливо.

Существует множество ограничений, которые снижают возможность использования газа, как топлива: падение отдачи N двигателя от 10 до 15%; ухудшение тягово-скоростных свойств автомобиля (время разгона

увеличивается на 24-30%, максимальная скорость движения снижается на 5-7%, максимальный угол преодолеваемого подъема снижается на 30-40%); потребность в прочных баллонах для хранения газа. Также из-за большой энергии воспламенения, низкой теплопроводности и скорости распространения пламени возникает проблема с воспламеняемостью ТВС.

Увеличение скорости распространения пламени, уменьшение энергии воспламенения топливной смеси, при обеспечении снижения концентрации токсичных выделений в ОГ газобаллонного ДВС возможно получить при добавке газообразного водорода в СПГ.

### **Выводы по главе 1**

По результатам экспериментальных исследований, обсуждённых в данной главе, не представляется возможным раскрыть, каким образом скорость распространения пламени может повлиять на концентрацию  $\text{NO}_x$  в отработавших газах, особенно при воздействии химического активатора горения – водорода на физико-химические свойства топливно-воздушной смеси. Развитие исследований в данной области необходимо для возможности дальнейшего воздействия на процесс сгорания через изменение физико-химических свойств ТВС, цель которого – снижение концентрации  $\text{NO}_x$  в отработавших газах теплового поршневого двигателя за счёт изменения скоростей распространения пламени при добавке водорода в ТВС.

Анализ механизмов образования окислов азота и особенностей протекания процессов сгорания в поршневых ДВС с внешним смесеобразованием даёт возможность сформулировать задачи исследования в следующем виде;

1. Определение влияния режимных параметров работы и физико-химических свойств топливно-воздушной смеси на видимую скорость распространения пламени в камере сгорания переменного объёма поршневого ДВС при сопоставлении с известными результатами экспериментов.;

2. Определить экспериментальным путём влияние скорости распространения пламени на концентрацию  $\text{NO}_x$  в отработавших газах;

3. Изучить закономерности поведения скорости распространения и ионного тока пламени в камере сгорания при добавке газообразного водорода в топливно-воздушную смесь;

4. Разработать модель и на её основе методику для определения концентрации  $\text{NO}$  с учётом режимных параметров работы, особенностей конструкции ДВС и изменения физико-химических свойств топливно-воздушной смеси при добавлении водорода в ТВС.

## **Глава 2. Экспериментальное оборудование и методика проведения экспериментов**

В данной работе рассмотрены данные из экспериментов, проведенных сотрудниками кафедры «ЭМ и СУ» под руководством к.т.н. Ивашина П.В. в составе М.П. Рамазанова, А.Д. Дерячева и А.Я. Твердохлебова при использовании установки и методики проведения испытаний изложенных далее в разделе.

Выполнение исследований в рамках сформулированной цели проводилось на оборудовании специализированной экспериментальной базы, созданной для изучения характеристик распространения пламени в камере переменного объёма и их связи с эффективностью работы ДВС и его токсичных показателей.

Более подробный процесс изучения работы двигателя и процесс сгорания, как правило, проводят на одноцилиндровых установках, а так же на тех установках, где процесс сгорания состоит на одиночных циклах. На таких установках предоставляется возможность контролирования и изменения параметров рабочего режима двигателя (давления, температуры сжатия, температуры стенок, коэффициента избытка воздуха) при постоянстве всех остальных параметров

## 2.1 Экспериментальная установка

Исследования характеристик процесса распространения пламени (скорости, электропроводности, обусловленной хемионизацией и ширины зоны горения) и закономерностей, связывающих эти характеристики с вредными выделениями в отработавших газах, проводились при использовании специальной установки УИТ-85 [98] (рисунок 2.1.1).



Рисунок 2.1.1 – Экспериментальная установка УИТ–85

Конструкция установки по основным параметрам соответствует конструкции автомобильного ДВС. В то же время она отвечает требованиям,

позволяющим достаточно глубоко проводить исследования процесса сгорания в условиях, приближенных к существующим в поршневых двигателях.

УИТ-85 смоделирована с одноцилиндрового четырехтактного двигателя с внешним смесеобразованием с конструктивными параметрами – диаметр цилиндра 85 мм и отношением хода поршня к диаметру цилиндра  $S/D = 1.35$ . Одним из главных достоинств этой установки заключается в возможности изменять степень сжатия. Привод коленчатого вала (КВ) осуществляется электромотором, чем обеспечивается поддержание частоты вращения КВ постоянным при изменении различных исследуемых параметров. Установка позволяет проводить исследования на двухрежимах вращения коленчатого вала: 600 и 900  $\text{мин}^{-1}$  (об/мин). Приготовление топливно-воздушной смеси производится либо с использованием простого одножиклёрного карбюратора, либо при впрыске топлива через форсунку во впускной канал. Для обеспечения гомогенности горючей смеси в конструкции установки установлен подогреваемый впускной трубопровод. Для воспроизводимости результатов испытаний необходимо было поддерживать постоянными во впускной системе как влажность воздуха, так и температуру. Таким образом конструкция обеспечивает максимальную однородность ТВС при переходе от цикла к следующему циклу, что приводит к значительному снижению межциклового нестационарности (МЦН) работы установки, одно из требований, необходимых для соблюдения при исследовании процесса распространения пламени.

Рассмотренные особенности конструкции экспериментальной установки определили её выбор для исследования характеристик распространения фронта пламени и влияние их на образование оксида NO в ОГ.

В головке камеры сгорания установки выполнено резьбовое гнездо, в которое могут устанавливаться ионизационные датчики различных конструкций. При этом конструкция камеры сгорания установки не изменяется. Конструкция используемой установки обеспечивает контроль основных режимных параметров при проведении различных исследований, а

именно: температуру охлаждающей жидкости, степень сжатия, частоту вращения КВ, состав смеси, угол опережения зажигания и поочерёдное их изменение. При этом для исследуемых параметров, независимо друг от друга, определяются зависимости того или иного фактора на процессы распространения пламени и вредные выделения в ОГ. Всё это подтверждает возможность установки воспроизведения с высокой точностью режимов испытаний – является важным условием при исследовании процессов сгорания. Анализ опубликованных результатов исследований характеристик распространения пламени в камерах сгорания ДВС, в которых использовались ионизационные датчики различных конструкций, позволил обосновать использование установки УИТ-85 для моделирования процессов, реализующихся в автомобильных двигателях и поршневых установках.

Схема экспериментальной установки, используемой при проведении испытаний, показана на рисунке 2.1.2.

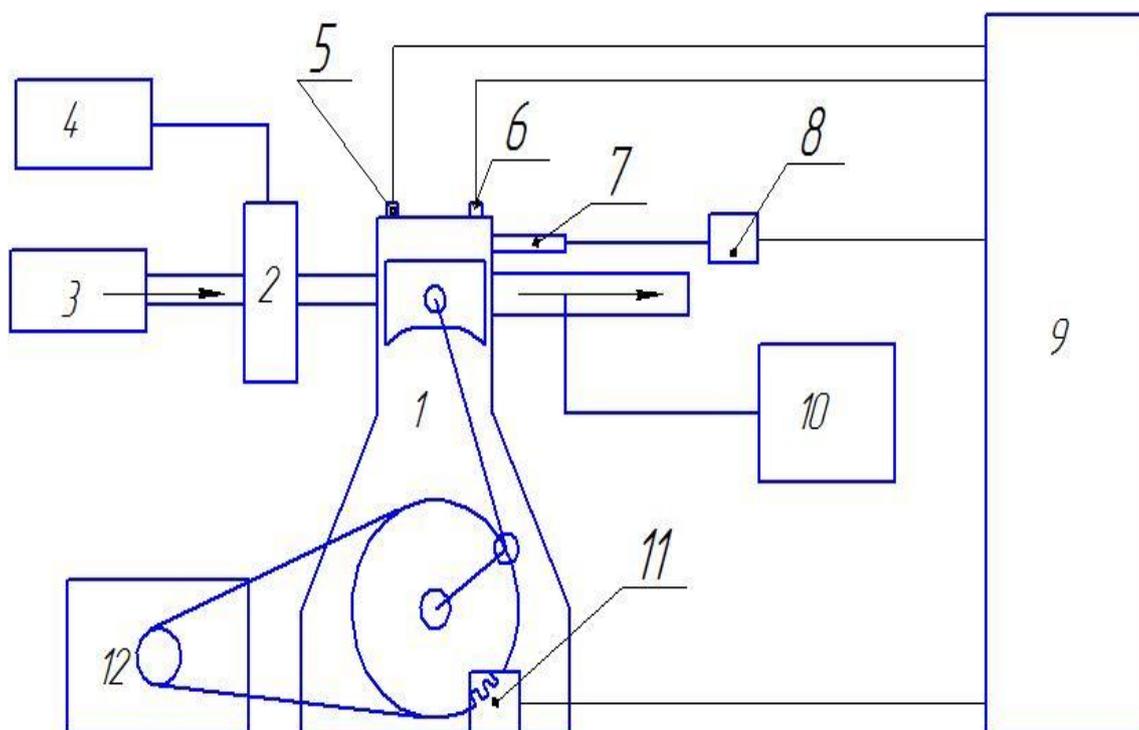


Рисунок 2.1.2 – Схема экспериментальной установки:

1 - УИТ-85 – одноцилиндровая моторная установка; 2 – форсунка впрыска топлива; 3 – система для впуска воздуха и система измерения расхода воздуха; 4 - система подачи топлива с системой измерения расхода топлива; 5 - датчик регистрации давления в камере сгорания; 6 - ионизационный датчик; 7 - свеча зажигания; 8 - система регистрации подачи и наличия искрового разряда; 9 - система сбора экспериментальных данных и характеристик работы установки ; 10 – газоанализатор; 11 - датчик положения коленчатого вала; 12 – электромотор привода коленчатого вала

Основной узел экспериментального стенда - одноцилиндровая моторная установка УИТ-85 (поз. 1). Установка содержит одноцилиндровый четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием и искровым зажиганием, электрическим приводом к коленчатому валу (поз. 12) от асинхронного двухскоростного электромотора переменного тока. Электромотор выполняет функции запуска и поддерживает постоянную частоту вращения коленчатого вала. В качестве исследовательского оборудования имеется пульт управления, контрольно-измерительная аппаратура и вспомогательное оборудование

Экспериментальная установка для проведения испытаний была дополнена системой хранения и подачи сжатого природного газа (СПГ), рисунок 2.1.3. Принцип работы системы подачи СПГ заключался в том, что газ подавался под давлением из (РВД) через двухпозиционный дроссель (Д1) и предохранительный электроклапан (К1) в газовый редуктор (Р1). Затем давление подаваемого газа снижалось в редукторе до 0,4 МПа. Далее, при открытом предохранительном клапане (К2), природный газ поступает в специальный блок форсунок (БФ), имеющим систему контроля, устанавливающий время открытия (скважность) каждой из форсунок в диапазоне от 10 до 90%.

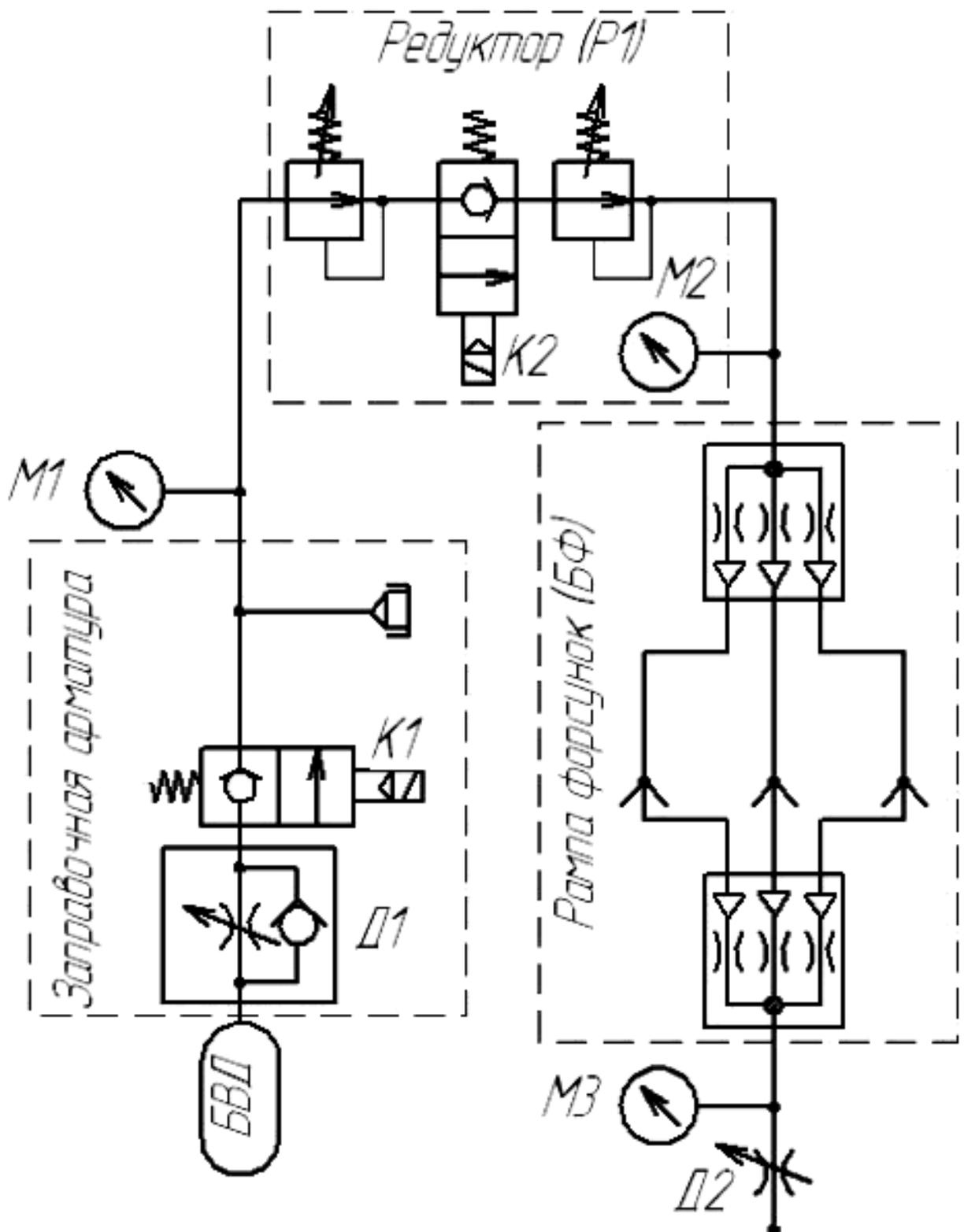


Рисунок 2.1.2 – Схема системы хранения и регулирования процессом подачи СПГ в камеру сгорания установки

БВД – баллон повышенного давления; Д1 – двухпозиционный дроссель; К1 и К2 – газовые предохранительные клапаны; М1, М2 и М3 – манометры, регистрирующие в системах высокое, среднее и низкое давление; БФ – блок

газовых форсунок; Р1 – газовый редуктор; Д2 – дроссель регулирования давления в магистрали низкого давления.

Задаваемый расход СПГ обеспечивался соответствующей скважностью форсунки. Рисунок 2.1.4 наглядно иллюстрирует, каким образом скважности первой форсунки определяют массовый расход газа.

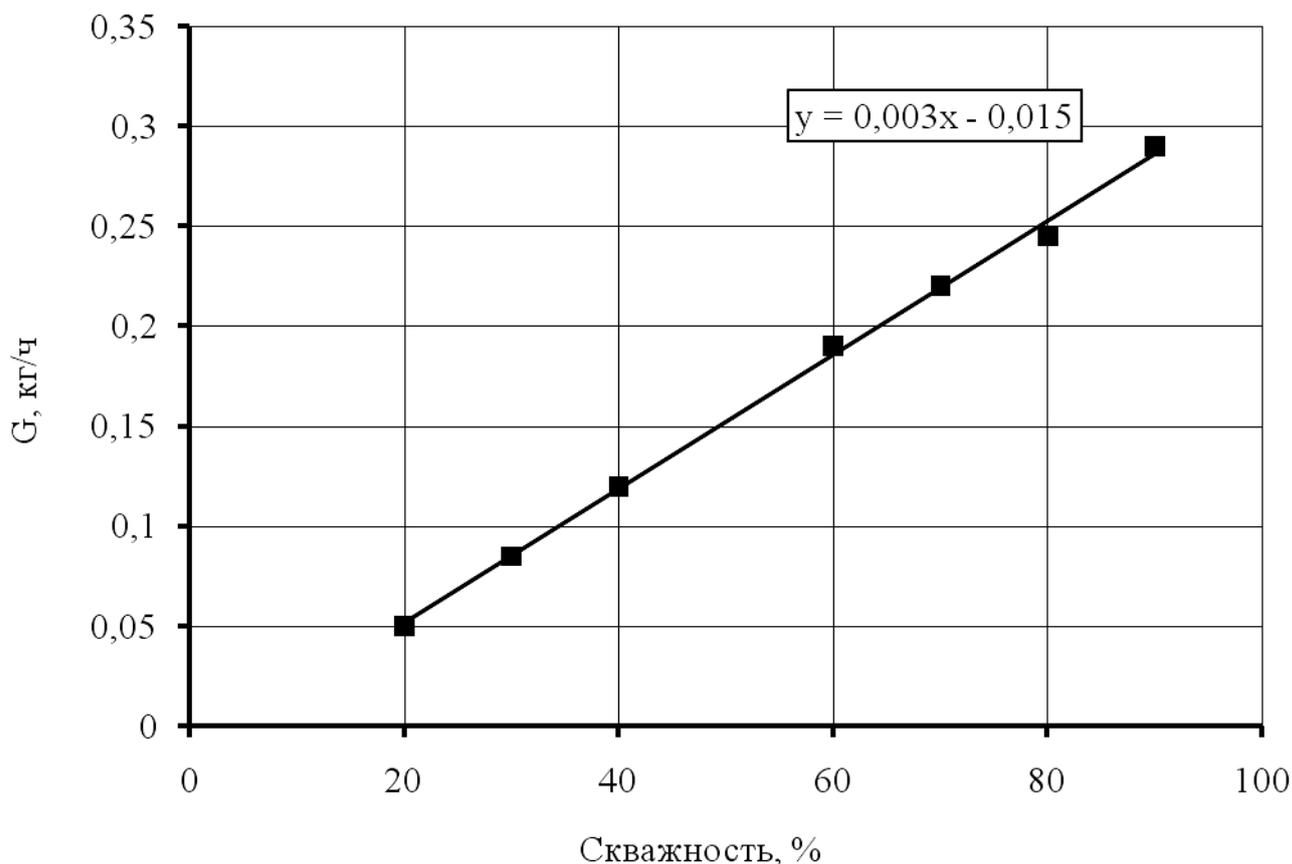


Рисунок 2.1.4 – Зависимость массового расхода СПГ от скважности первой форсунки.

Для определения влияния добавляемого водорода в топливно-воздушную смесь на характеристики перемещения фронта пламени и величины концентрации окислов азота в продуктах сгорания за выпускным клапаном в составе экспериментального оборудования была смонтирована система хранения и подачи водорода в топливно-воздушную смесь.

Схема разработанной системы представлена на рисунке 2.1.5.. Система работает по принципу: водород из резервуара под высоким давлением через редуктор и блок форсунок, включающий в себя четыре форсунки, подается во

впускной коллектор двигателя. Для снижения действия изменения давления во впускном коллекторе, перед блоком форсунок поддерживался перепад давления  $\Delta P = 0,35$  МПа.

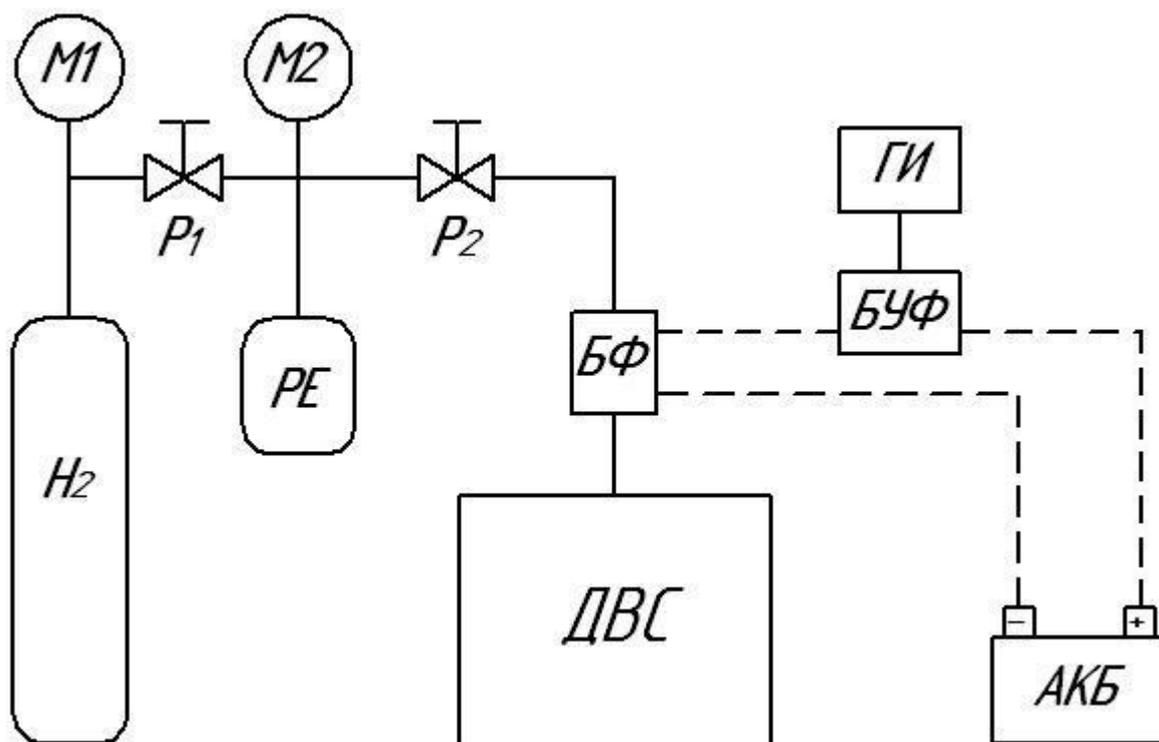


Рисунок 2.1.5 – Схема система хранения и подачи водорода в ТВС

$H_2$  – водородный баллон высокого давления;

M1, M2 – манометры для контроля и регистрации давления газа;

P1, P2 – редукторы для поддержания заданного давления;

PE –емкость газа для последующего расхода;

БФ – блок газовых форсунок;

БУФ – электронный блок управления расхода газа через форсунки;

ГИ – генератор, задающий характеристики импульсов;

АКБ –аккумуляторов.

Изменение массового расхода впрыскиваемого в ТВС водорода осуществлялось при изменении скважности газовых форсунок. Кроме этого, при необходимости, производилось изменение массового расхода через общий блок форсунок путём полного отключения или одной, или нескольких газовых

форсунок. При этом линия тарировки меняет своё положение в соответствии с величиной массового расхода водорода через отключенные форсунки.

На рисунке 2.1.6 представлена тарировочная линия, определяющая массовый расход водорода в зависимости от времени срабатывания форсунки .

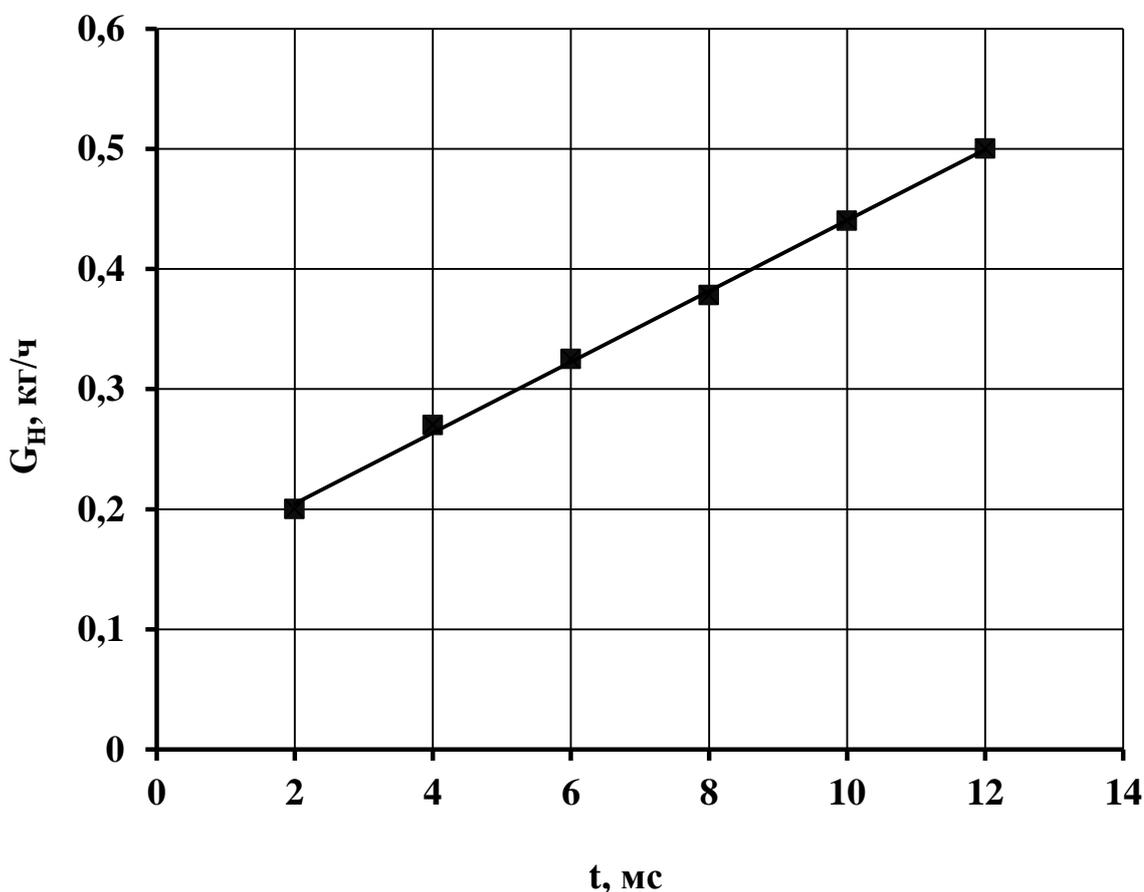


Рисунок 2.1.6 –Тарировочная прямая, определяющая массовый расход водорода в зависимости от времени срабатывания форсунки .

Состав отработавших газов, в том числе концентрация NO в ОГ, определялся при использовании газоанализатора «Автотест» фирмы Мета класс точности равен 0. При проведении анализа отработавшего газа определялась концентрация следующих компонентов: CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH.

На рисунке 2.1.7 представлена фотография микропроцессорного газоанализатора.



Рисунок 2.1.7 –газоанализатор фирмы Мета

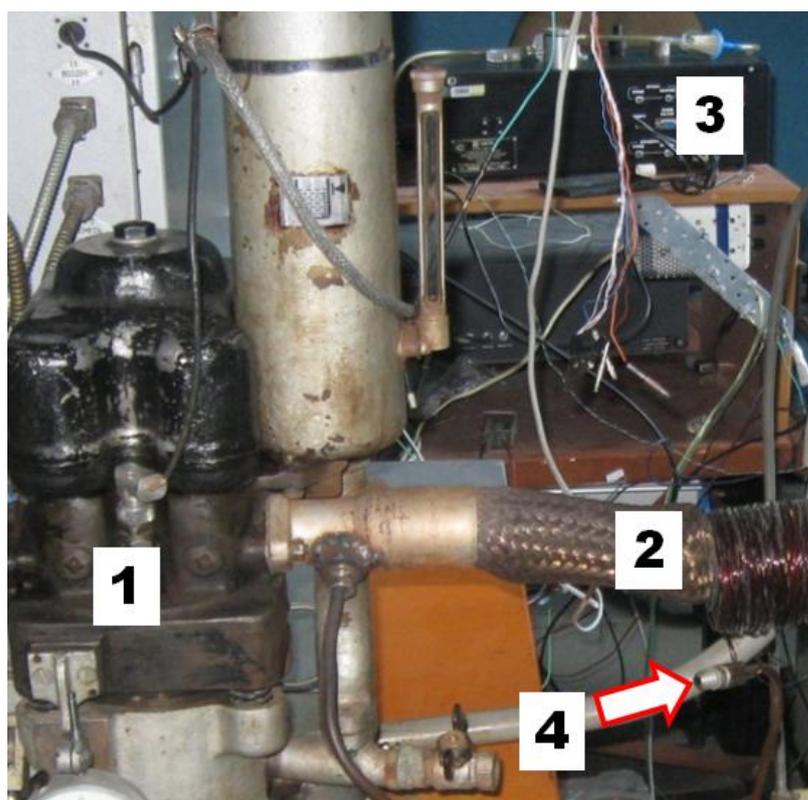


Рисунок 2.1.7 – Фотография места отбора проб ОГ (показано стрелкой)

1 – двигатель; 2 – выпускной канала;

3 – микропроцессорный газоанализатор; 4 – пробоотборник.

Работоспособность газоанализатора обеспечивалась специально разработанной системой отбора и остывания проб отработавших газов в выпускном трубопроводе. Фотография места отбора проб ОГ представлена на рисунке 2.2.13. Отбор газа производится из мерного участка в выпускном трубопроводе через особый штуцер, потом подается в систему остывания и конденсации воды, потом подается через фильтр в газоанализатор. Перемещение газа выполняется особым насосом (побудителем расхода) интегрированным в систему газоанализатора.

Регистрация и хранение сигналов датчиков осуществляется применением системы сбора данных L - 783M(создание L-Card). Всем пригодная скоростная цена на шину PCI, которая обеспечивает возможность ввода в мегагерцовом спектре аналоговых сигналов, а для цифровых сигналов - ввод/вывод. Свойства АЦП: 12 бит/ 3МГц, количество рабочих каналов 16.

Измерение ионных токов производилось при использовании двух ионизационных датчиков (ИД), конструкции которых представлены на рисунках 2.1.8 и 2.1.9.

ИД состоит из электрода (ИЗ), изолированного от корпуса с помощью керамической трубки. Вторым электродом, отрицательным, являются металлические элементы двигателя, в данном случае – корпус датчика. Ионизационный датчик, расположенный в одном корпусе со свечой зажигания, рис. 2.1.8 предназначен для определения характеристик перемещения пламени в первой фазе сгорания. Датчики, показанные на рис. 2.1.9 позволяют определять и характеристики перемещения фронта пламени, а также изменение индикаторного давления на тактах впуска, сжатия, расширения, и, в особенности при сгорании ТВС.

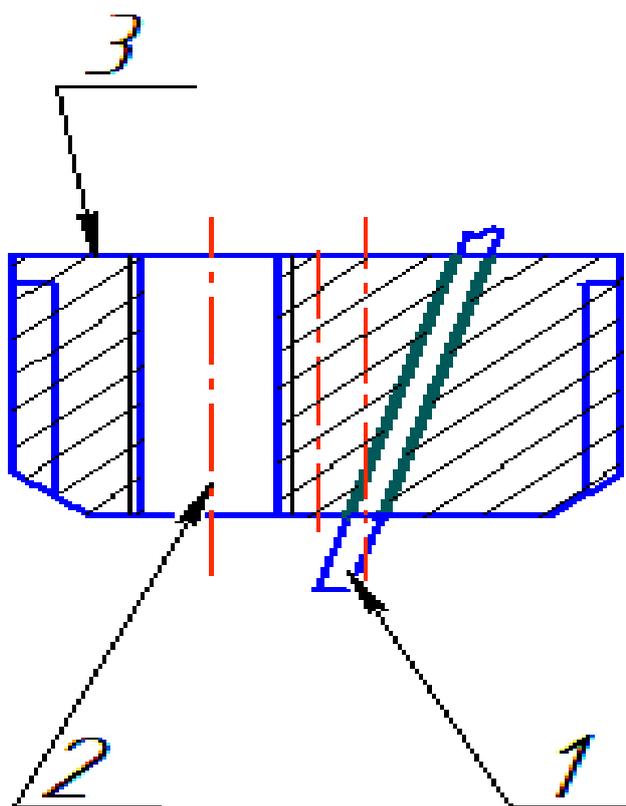


Рисунок 2.1.8 – Схема ИД, изготовленного в одном корпусе со свечой зажигания 1 –электрод ИД; 2 – отверстие для установки свечи зажигания; 3 – корпус датчиков.

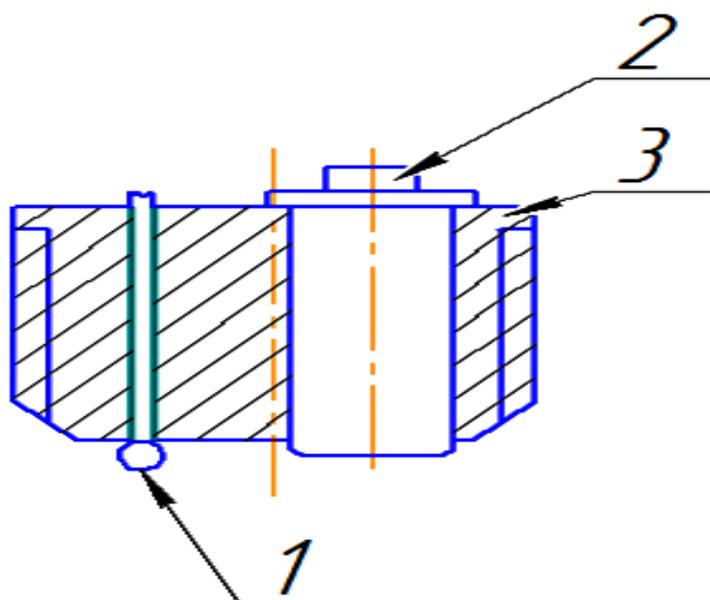


Рисунок 2.1.9 – ионизационный датчик в одном корпусе с датчиком давления: 1 – электрод ИД; 2 – датчик давления; 3 – корпус датчиков.

На рисунке 2.1.10 показана установка датчиков в головку камеры сгорания. Один ионизационный датчик расположен вблизи от свечи зажигания. Расстояние между электродом датчика составляло 7 мм от электрода свечи. Второй ИД с датчиком давления установлена максимальном удалении от свечи зажигания. Расстояние между свечой и ИД составляло 85 мм.

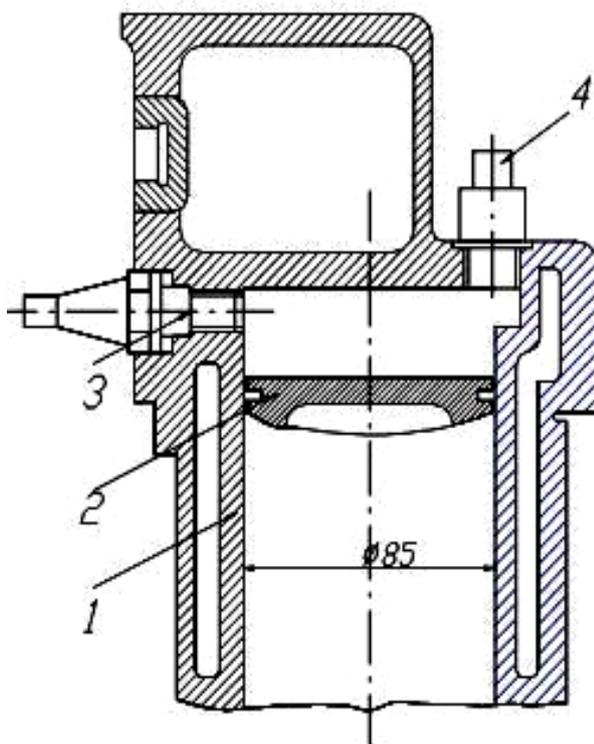


Рисунок 2.1.10 – Установка датчиков в головке камеры сгорания

1 – цилиндр установки; 2 – поршень с уплотнительными кольцами;  
3 – ионизационный датчик со свечой зажигания; 4 – ионизационный датчик и датчик давления.

Появление тока ионизации, возникающего во фронте пламени, регистрировалось при омывании пламенем электрода и корпуса датчиков при замыкании электрической цепи. Рассматриваемый эффект обусловлен химической ионизацией, возникающей во фронте пламени при сгорании углеводородовоздушного топлива, т.е. электропроводностью углеводородного пламени.

Ионный ток в цепи ИД существует в течение промежутка времени, пока электроды датчика одновременно омываются пламенем. Результаты исследований по измерению промежутков времени ( $t$ ) между подачей высоковольтного напряжения на свечу зажигания до появления ионного тока в цепи ИД позволяют определить видимую среднюю скорость распространения пламени ( $U$ ) по формуле:

$$U = \frac{L}{t}, \quad (2.1)$$

где  $L$  – расстояние между свечой зажигания и электродом ионизационного датчика, м.

## 2.2 Методика проведения эксперимента

Для досконального изучения процесса горения в камере сгорания одноцилиндровой установки употребляли способ с зондом, при котором происходило явление электропроводности углеводородного пламени.

При проведении разных исследований, связанных с изучением черт пламени, характеристик рабочего процесса и вредоносных выбросов на практике употреблялся способ снятия разных черт мотора. Любая черта представляет собой определенную зависимость характеристик сгорания и пламени, какие имеют все шансы поставить разные характеристики ДВС. С целью разобраться с воздействием химического состава ТВС на характеристики сгорания и экологические характеристики к горючему добавлялся водород. Поскольку изучения добавок водорода в ТВС соединено с конкретным воздействием на процесс сгорания в поршневом двигателе, то в качестве главных черт при проведении опыта целенаправленно использовали регулировочные характеристики по составу смеси и углу опережения зажигания. Такие свойства разрешают более полно поставить воздействие параметров горючего на характеристики сгорания и индивидуальности протекания рабочего процесса. Для получения итогов разбора действия

химического состава топливно-воздушной смеси с добавлялся водорода в горючее. К примеру, исследование добавок водорода в ТВС тесно соединено с конкретным действием на процесс сгорания в двигателе, то в качестве ведущих данных при проведении целенаправленных экспериментов применялись свойства регулировочных характеристик по составу смеси и УОЗ.

Отсюда следует, что являющимися причинами в проведённых исследованиях являлись: состав смеси, прибавляемый водород в ТВС, УОЗ и частота вращения коленчатого вала. Сообразно результатам изучений смогли построить, регулировочную характеристику по составу смеси при различных причинах, при которых, следовательно, модифицировалось сосредоточение оксида азота. В процессе изучений проводились последующие измерения разных величин: частота вращения коленчатого вала, расход бензина, воздуха и водорода, УОЗ, индикаторное влияние, количество вырабатываемого оксида азота, ступень сжатия и характеристик ионизации.

С достижением лучшего приготовления гомогенной смеси лёгкий заряд на впуске подогревается электрическим нагревателем и использует долговременную температуру  $54^{\circ}\text{C}$ , которая поддерживается датчиком температуры с обратной связью. Еще производился контроль над параметрами, какие охарактеризовывают атмосферные условия (влияние, влажность, температура) и положение установки (температура остужающей воды и температура масла в картере). Экспериментальный аппарат может позволить без видимых причин видоизменять степени сжатия ( $\epsilon$ ). В устройство конфигурации степени сжатия вступает направляющая и червячная передача, позволяющая смещать головку и видоизменять степень сжатия от 4 по 10 ( $\epsilon$ ). Процесс измерения предоставленного параметра исполнялось индикатором, установленном на платике головки цилиндра.

Для того чтоб найти коэффициент излишка воздуха, сотрудники спроектировали и собрали специальную систему измерения воздуха и расхода горючего.

Для того чтобы найти соответствие соотношений компонентов состава горючей смеси была изобретена, изготовлены узлы для сборки системы измерения расхода воздуха схема системы представлена На рисунке 2.2.1 показаны основные элементы разработанной системы.

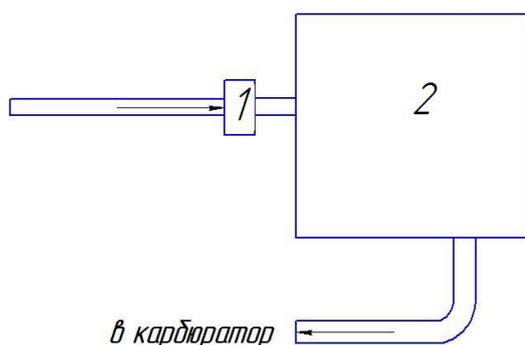


Рисунок 2.2.1 – Схема системы измерения расхода воздуха:

1- датчик массового расхода воздуха, 2 – ресивер

был откалиброван и проверен в критериях работы двигателя с внедрением конфигурацией впускного трубопровода и ресивера. Испытания осуществляли 2-мя методами:

- объемным методом (при двигателем этом расходовался ограниченный объем воздуха, но обеспечивалось постоянное давление во впускном канале);

- сопоставлением с результатами измерений по широкополосному датчику определения концентрации кислорода (ф. ETAS) одновременно с измерением массового расхода топлива.

Внедрение ресивера (2) подействовало значительно понизить пульсацию воздуха для четкого снятия расхода воздуха. Для измерения массового расхода воздуха использовался термоанемометрический датчик расхода воздуха типа BOSCH. Датчик был усовершенствован сотрудниками кафедры и предварительно откалиброван с поддержкой сужающего устройства на равномерном потоке. Кроме этого, датчик

Калибровочную кривую можно рассмотреть на рисунке 2.2.2. Можно наблюдать, что кривая полученных данных отлично аппроксимировалась полиномом второй степени.

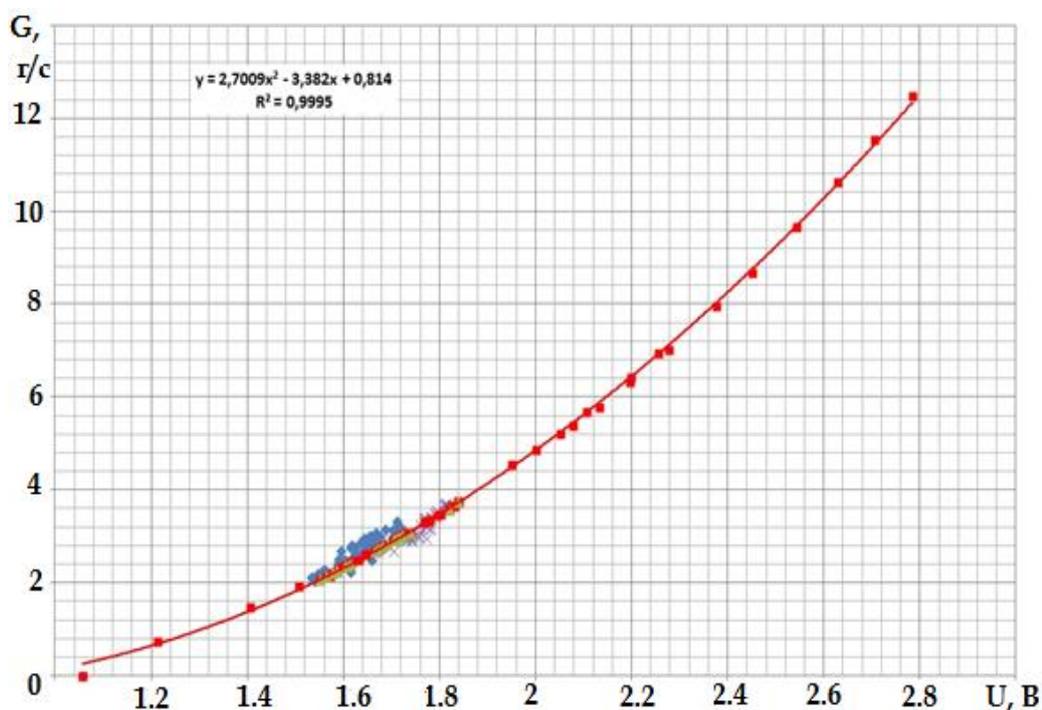


Рисунок 2.2.4 –Тарировочная кривая датчика расхода воздуха

Для определения положения коленчатого вала относительно мёртвых точек был спроектирован и изготовлен специальный зубчатый диск, имеющий 60 зубцов и маркеры ВМТ и НМТ, который был смонтирован на носок коленчатого вала. Регистрация положений зубчатого диска относительно ВМТ и НМТ и сохранение результатов измерений, используемых для работы с индикаторными диаграммами осуществлялась с помощью оптического датчика Honeywell. Неточность изготовления зубчатого диска являлась основной причиной погрешностей. Также погрешности вносились из-за шума при регистрации сигналов, а также из-за ошибок при обработке и проведении анализа результатов, записанных на АЦП.

Определение значения угла опережения зажигания осуществлялось использованием электромагнитного датчика который был соединён с высоковольтным проводом системы зажигания. Датчик получал сигнал во

время прохождения высоковольтного импульса в свече зажигания, Полученный сигнал преобразовывался в прямоугольный и передавался для сбора и регистрации экспериментальных данных.

Для снятия значений ионного тока с электродов ИД была изобретена и сделана система возбуждения, отслеживания и анализа ионных токов в КС ДВС. Главным составляющим элементом являлся регулируемый источник неизменного напряжения Mastech DC Power Supply NY3001E. Источник питания был обустроен неполярным конденсатором для убавления пульсаций на выходе источника питания, поскольку измерялись небольшие токи. Не считая только этого, обеспечивалось отключение источника питания от конденсатора, для использования заряда, чтобы исключить помехи распространяемые источником питания. Для этого нужна корректировка показателей конденсатора и возможные исправления. Когда фронт пламени омывал электрод и элементы камеры сгорания, происходило замыкание электрической цепи с появлением в ней ионного тока, возникающего из-за химической ионизации в пламени углеводородного топлива.

Регистрация ионного тока и обработка итогов измерений проводилась с помощью специально разработанного программного обеспечения для использования на ПК. Конструктивные особенности установки, выбор точки заземления на элементе корпуса и обеспечение техники сохранности регистрируемых параметров пришлось изобрести систему гальванической развязки, встроенную в высоковольтную цепь побуждения ионного тока и в сигнальную цепь, связаную с АЦП.

Электрическая схема записи ионного тока с встроенной гальванической развязкой представлена на рисунке 2.2.5

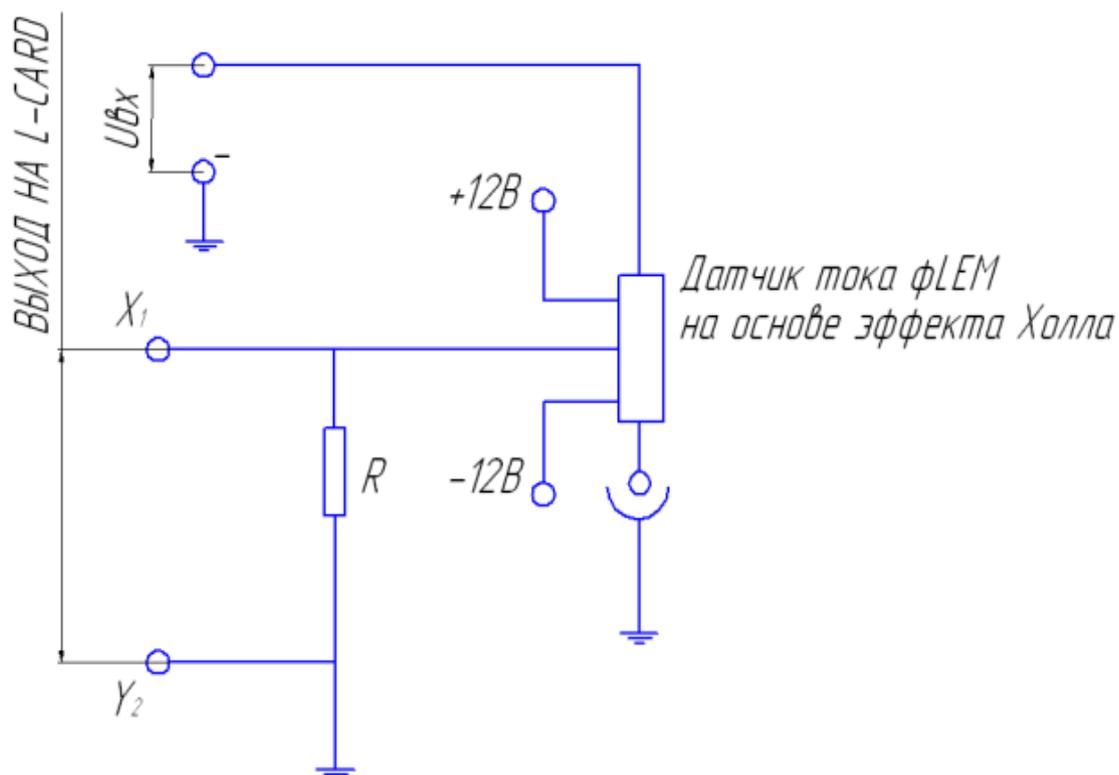


Рисунок 2.2.5 –Электрическая схема записи ионного тока с встроенной гальванической развязкой

Для разбора энергетических характеристик процесса горения в ДВС изобретена система индицирования. Предоставленная система охватывает следующие главные составляющие:

- датчик давления, смонтированный в головку камеры сгорания, и отвечающий потребностям согласно динамическим погрешностям и обладающий термостабильностью;
- датчик давления с усилителем сигнала;
- система регистрации положения коленчатого вала относительно ВМТ и НМТ;
- комплекс для регистрации результатов измерения.

Измерение величины давления осуществлялось с помощью датчика давления фирмы Kistler (Швейцария). Датчик совмещен в одном корпусе со свечой зажигания.

Работоспособность газоанализатора обеспечивалась специально разработанной системой отбора и остывания проб отработавших газов в выпускном трубопроводе. Отбор газа производится из мерного участка в выпускном трубопроводе через особый штуцер, потом подается в систему остывания и конденсации воды, потом подается через фильтр в газоанализатор. Перемещение газа выполняется особым насосом (побудителем расхода) интегрированным в систему газоанализатора.

Регистрация и хранение сигналов датчиков осуществляется применением системы сбора данных L - 783M(создание L-Card). Всем пригодная скоростная цена на шину PCI, которая обеспечивает возможность ввода в мегагерцовом спектре аналоговых сигналов, а для цифровых сигналов - ввод/вывод. Свойства АЦП: 12 бит/ 3МГц, количество рабочих каналов 16.

Подготовительный анализ сигналов нужен для выявления недостоверных данных при работе каждой системы регистрации параметрических (положение вала коленчатого, отметчика искры зажигания, массового расхода воздуха, горючего) факторов и результатов исследований. В процессе подготовительного разбора оценивается присутствие сигналов, соответствие знаков – помеха, отклик сигналов на существенное модифицирование варьируемых причин, а еще характер записи сигнала при неимении горения, вызванного выключением подачи горючего либо зажигания.

Для получения надежных сигналов, отражающих ионный ток в пламени, распространяющемся в камере сгорания только для одного режима работы нужна статистическая переработка огромной численности осциллограмм поочередных циклов. В этом случае усреднялись не менее 50 циклов, которые записывались в течение одного режима. Проводилась оценка расположения характеристик, оценивался и характер межциклового рассеяния. Для подавляющего большинства режимов определено обычное расположение характеристик оценки сигналов. Если расположение существенно различалось

от обычного, принималось заключение о повторе режима, иногда оно исключалось из обработки.

Все эксперименты выполнялись с одновременной регистрацией показаний с ионизационных датчиков, по искре зажигания, по датчику положения коленчатого вала, записывая осциллограммы, применяя многоканальный аналого-цифровой преобразователь L-Card. в накопитель компьютера. На рисунке 2.2.6 показана принципиальная схема записи параметров, регистрируемых в цепи ионизационных датчиков.

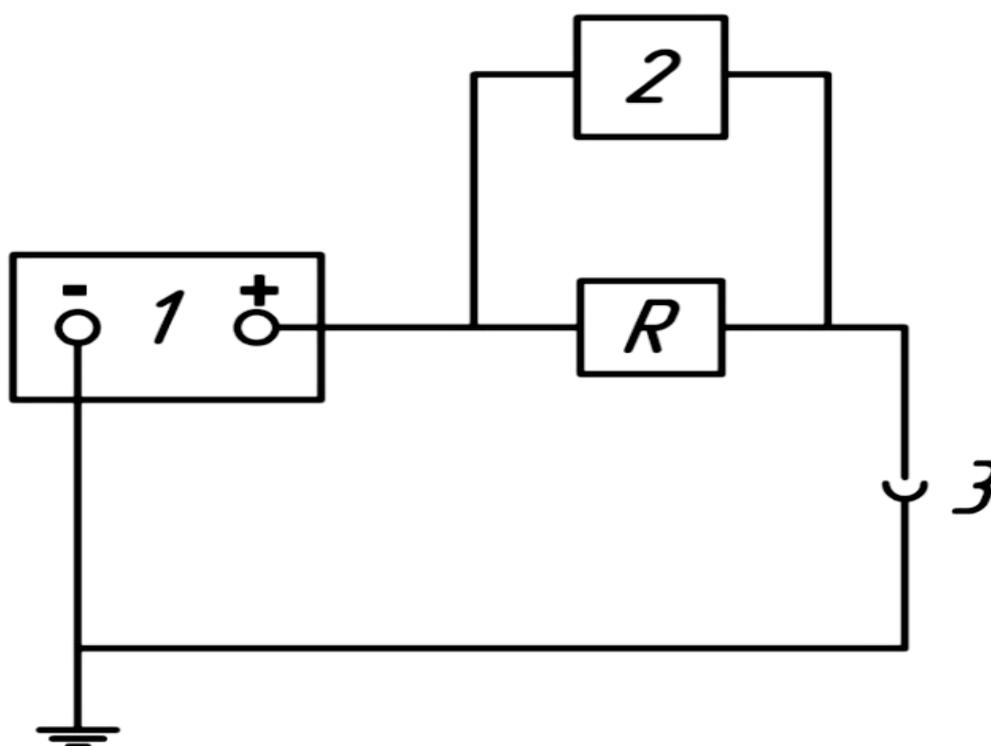


Рисунок 2.2.6 – Принципиальная схема системы записи параметров тока ионизации

1 –аккумуляторная батарея; 2 – осциллограф; 3 – ионизационный датчик

Проведение экспериментов осуществлялось после протестирования схемы для подтверждения существования линейной зависимости ионного тока от величины напряжения источника питания. Результаты, приведенные на рисунке 2.2.7 показывают - напряжение в измерительной цепи отвечает требованию нахождения вне области тока насыщения.

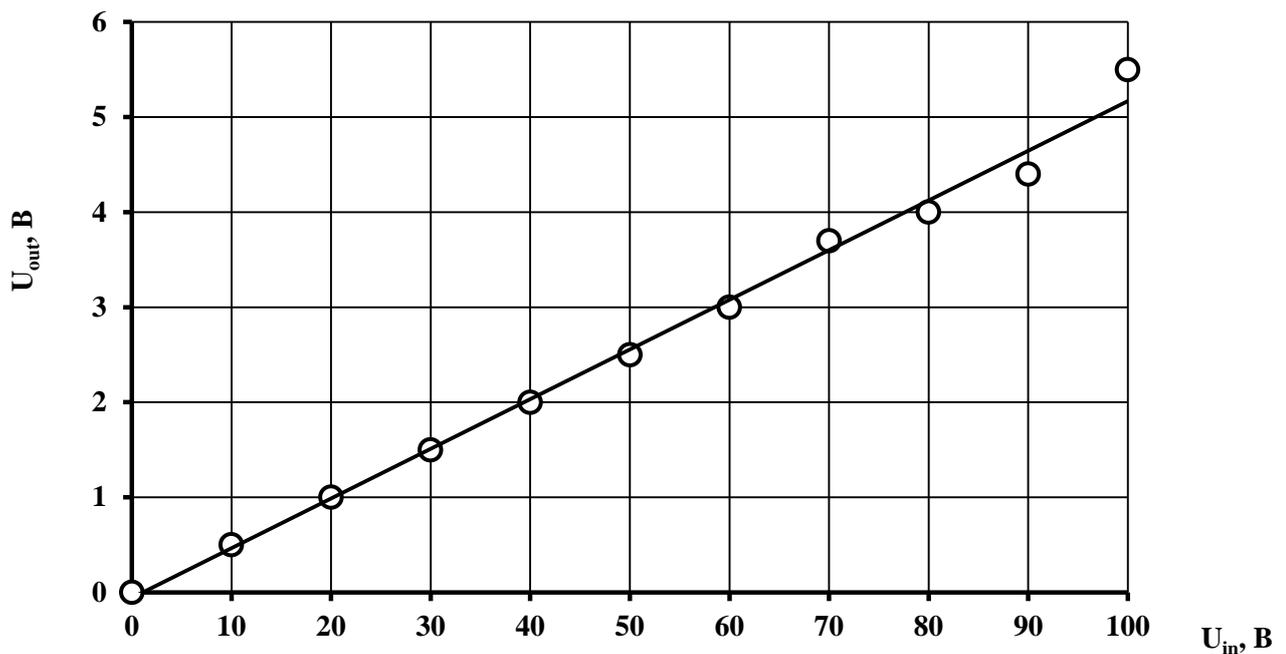


Рисунок 2.2.7 – Тестирование параметров измерительной цепи ионизационных датчиков.

При проведении комплекса испытаний записывались осциллограммы на всех режимах исследований. При осреднении сигналов учитывались следующие параметры:

1) промежуток времени от начала искрового разряда на электродах свечи зажигания до возникновения ионного тока в электрической сети ионизационного датчика, находящегося у свечи зажигания ( $t_1$ ) и для ИД, установленного в наиболее удаленной от неё зоне камеры сгорания ( $t_2$ );

2) величина ионного тока по датчику у свечи зажигания ( $I_1$ ) и по удаленному от этой свечи датчику ( $I_2$ );

3) промежуток времени существования ионного тока в цепи датчиков, установленных у свечи зажигания ( $t_{c1}$ ) и в цепи ионизационного датчика, расположенного в зоне КС, самой удаленной от свечи зажигания ( $t_{c2}$ );

4) промежутка времени от начала искрового разряда на электродах свечи зажигания до достижения максимума давления при сгорании ТВС в КС ДВС ( $t_{Pmax}$ );

5) значение максимального давления при сгорании ТВС ( $P_z$ ).

Среди определяющих факторов рассматривались коэффициент избытка воздуха (диапазон от 0,7 до 1,6) и объёмный расход водорода подаваемого в ТВС, равный 29; 47 и 58% (по объёму). Степень сжатия, при которой проводились испытания, равнялась 7, угол опережения зажигания (УОЗ) равнялся  $13^0$ , скоростные режимы поддерживались 600 и 900 об/мин. Изменение одного из перечисленных параметров приводил к изменению величины и характера протекания ионного тока.

На рисунке 2.2.3 показана «осредненная» осциллограмма записи основных исследуемых параметров.

Рассматривая поведение параметров распространения пламени и давления, записанные на осциллограмме можно сделать следующие заключения:

- результаты, зарегистрированные в цепи ионизационного датчика у свечи зажигания, отражают первую фазу сгорания;
- информация, полученная в цепи ионизационного датчика, удаленного от свечи зажигания, отражает процессы основной фазы сгорания.

Общепринято считать, что первая фаза сгорания протекает в промежуток времени от начала искрового разряда на электродах свечи зажигания до начала отрыва кривой процесса сгорания от кривой сжатия на индикаторной диаграмме, вторая фаза – это промежуток времени от окончания 1-ой фазы до достижения максимального давления сгорания на индикаторной диаграмме. Основная фаза сгорания результат объединения первой и второй фазы.

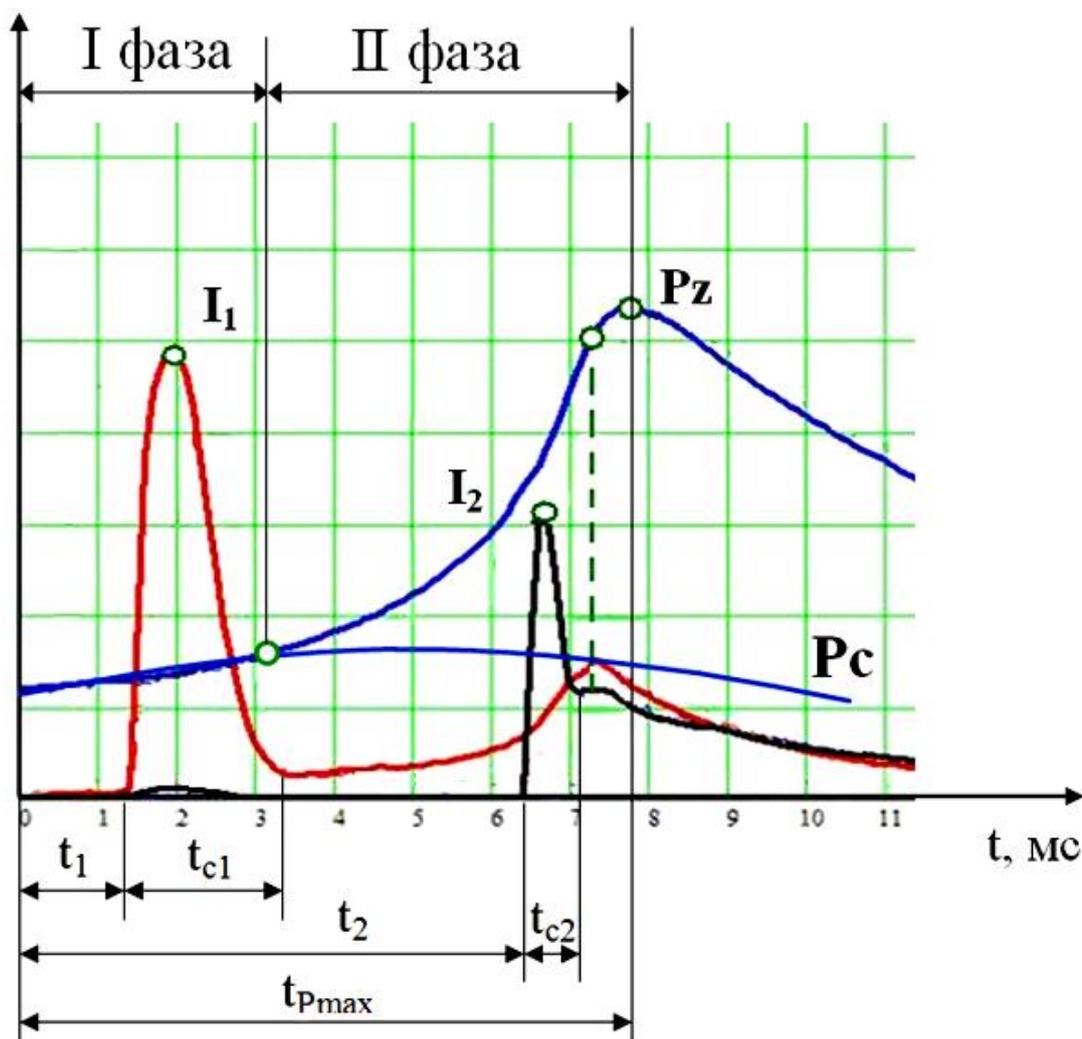


Рисунок 2.2.8 – Пример осредненной осциллограммы протекания ионного тока и индикаторного давления в процессе сгорания

$t_1$ ,  $t_2$  – обозначения промежутков времени от начала искрового разряда на электродах свечи зажигания до возникновения ионного тока в цепи ионизационного датчика, находящегося вблизи свечи зажигания и до возникновения ионного тока в цепи ионизационного датчика, расположенного в наиболее удаленном объёме камеры сгорания, соответственно;

$I_1$ ,  $I_2$  – ионные токи в цепи ионизационного датчика, установленного у свечи зажигания и в цепи ИД, установленного в наиболее удаленном от источника воспламенения объёме камеры сгорания, соответственно;

$t_{c1}$ ,  $t_{c2}$  – промежуток времени, в течение которого в цепи ионизационных датчиков регистрируется ионный ток: по датчику рядом со свечой зажигания и по удалённому датчику, соответственно;

$t_{P_{max}}$  – промежуток времени до достижения максимального давления в КС при сгорании ТВС, отсчитанный от начала искрового разряда на электродах свечи зажигания;

$P_z$  – величина максимального давления сгорания;

$P_c$  – давление сжатия.

### **Глава 3. Обработка результатов испытаний**

В рассматриваемой главе представлены обработанные и проанализированные результаты экспериментальных исследований по влиянию режимных параметров работы двигателя и изменения физикохимических свойств ТВС при применении в качестве топлива газообразного метана  $CH_4$  на концентрацию оксида азота в ОГ и характеристики распространения пламени. Проведено сравнение этих данных с результатами, полученными при использовании в качестве горючего бензина. Выполнена расчётная оценка теплотворной способности ТВС при работе на метане и бензине, так как это свойство смеси, при прочих равных условиях, определяет температуру продуктов сгорания и, следовательно, концентрацию вредных выделений по оксидам азота.

Обработка и анализ результатов экспериментального и аналитического исследования позволила сформулировать модель сгорания топливно-воздушной смеси, однородной по составу и фазе, в поршневом двигателе с искровым зажиганием при добавке химического активатора горения (водорода)

#### **3.1 Концентрация оксида азота в отработавших газах**

На рис. 3.1.1 представлены результаты измерения концентрации оксида азота (NO) в зависимости от состава смеси и доли добавляемого газообразного водорода в топливно-воздушную смесь. Эксперименты проведены при следующих условиях: угол опережения зажигания, УОЗ,  $\theta_z=21^\circ$  пкв, степень

сжатия,  $\varepsilon=7$ ,  $n=900$ об/мин; топливо метан; добавка водорода:  $\blacklozenge=0\%$ ,  $\blacksquare=5\%$ ,  $\blacktriangle=10\%$ ,  $\times=15\%$ ;

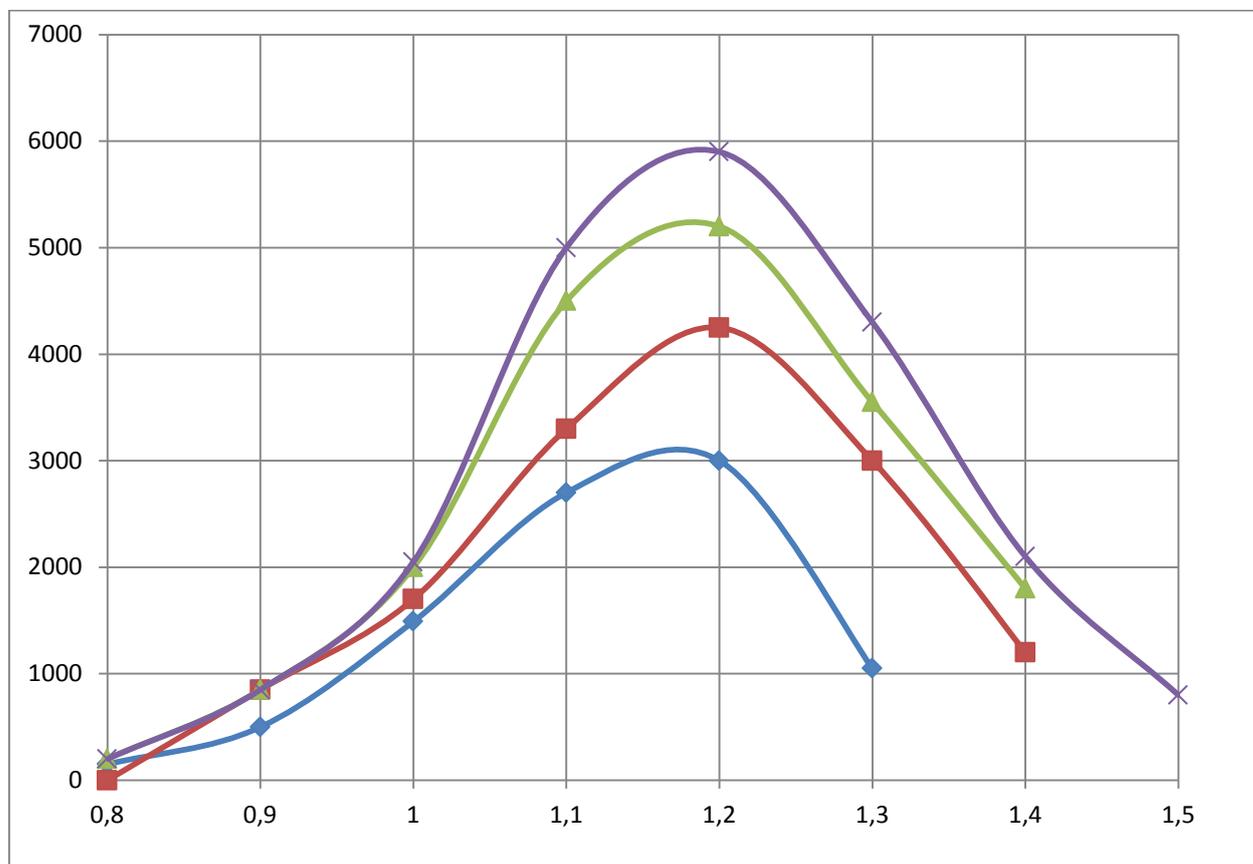


Рисунок 3.1.1 Концентрация оксида азота при использовании метановоздушной смеси с добавкой водорода

УОЗ  $\theta_{з}=21^{\circ}$  пкв, степень сжатия  $\varepsilon=7$ ,  $n=900$ об/мин; топливо Метан; добавка водорода:  $\blacklozenge=0\%$ ,  $\blacksquare=5\%$ ,  $\blacktriangle=10\%$ ,  $\times=15\%$ ;

С увеличением добавки водорода происходит существенный рост концентрации NO во всём диапазоне изменения коэффициента воздуха. Причиной роста концентрации NO может быть или увеличение температуры продуктов сгорания или при сохранении температуры увеличение времени пребывания кислорода и азота в зоне высокой температуры.

На рис. 3.1.2 представлено изменение теплотворной способности метановоздушной смеси при добавке в неё газообразного водорода.

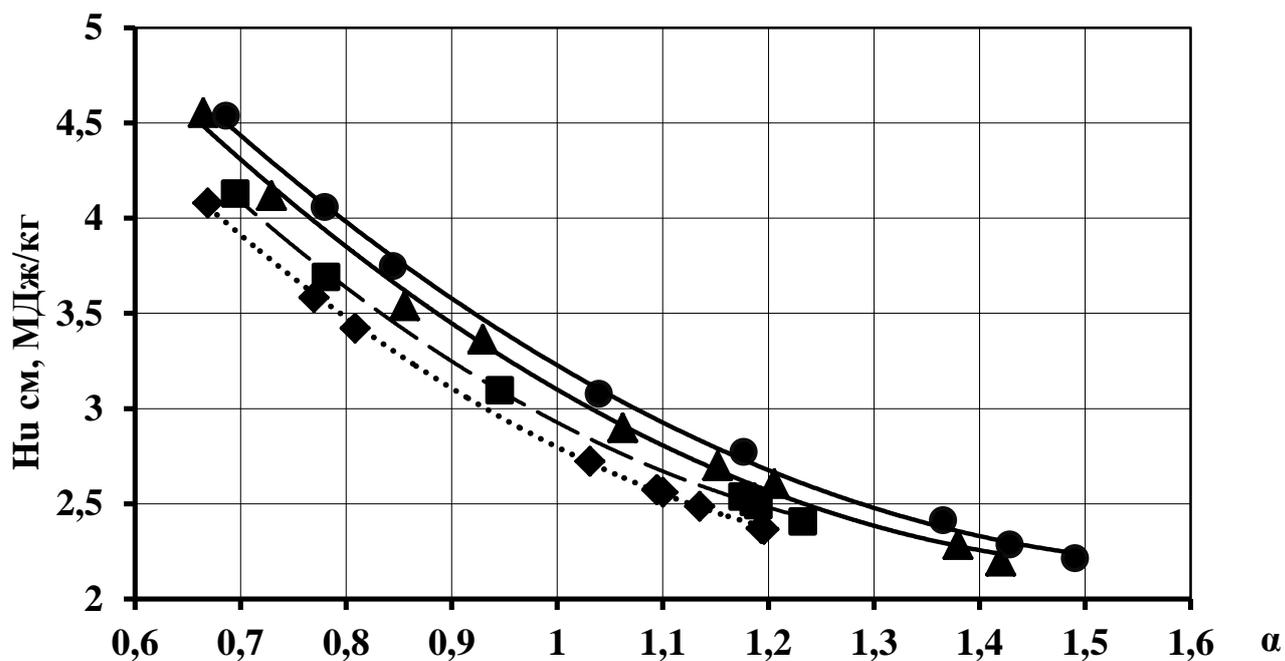


Рисунок 3.1.2 – Теплота сгорания метановодородовоздушной смеси:  
 ♦ –  $r_{H_2}=0\%$ ; ■ –  $r_{H_2}=29\%$ ; ▲ –  $r_{H_2}=47\%$ ; ● –  $r_{H_2}=58\%$ .

При добавке водорода происходит увеличение  $H_{u\text{см}}$ . В области добавок, применяющихся в настоящее время 20-30% это увеличение для стехиометрической смеси составляет около 3,5%.

Следовательно, за счёт добавки водорода в метановоздушную смесь ожидается незначительное повышение температуры продуктов сгорания.

Проанализируем каким образом добавка водорода окажет влияние на концентрацию оксида азота при сжигании бензовоздушной смеси с использованием данных, полученных Коломийцем [40]. Результаты его измерений представлены на рис. 3.1.3.

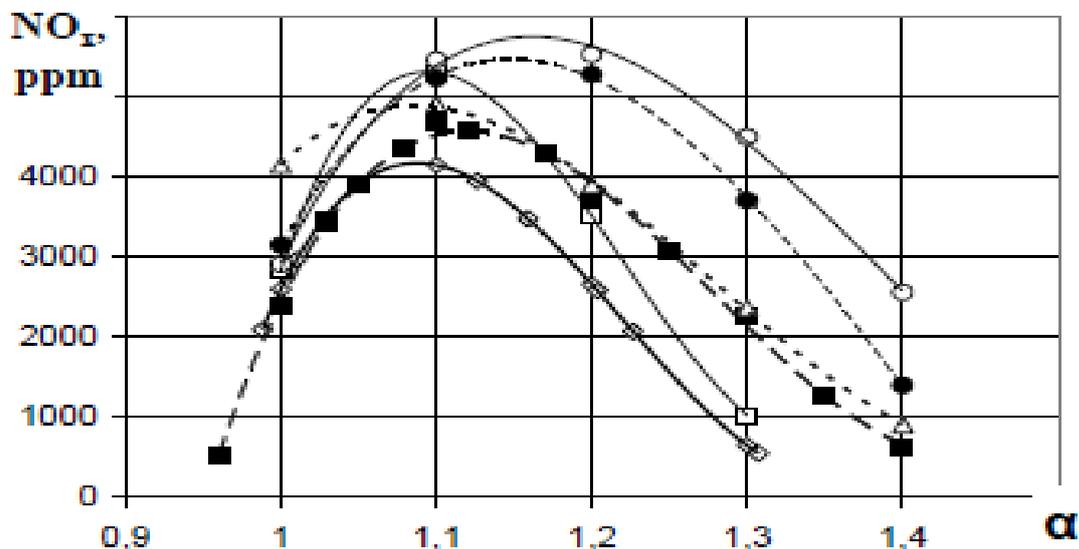


Рисунок 3.1.3 Концентрация оксидов азота в ОГ от коэффициента избытка воздуха

$n=900$  об/мин, степень сжатия – 7; добавка водорода:  
 (УОЗ  $13^{\circ}$ ):  $\diamond=0\%$ ,  $\blacksquare=3\%$ ,  $\Delta=5\%$ ; (УОЗ  $21^{\circ}$ ):  $\square=0\%$ ,  $\bullet=3\%$ ,  $\circ=5\%$ .

Представленные результаты показывают, что с добавкой водорода концентрация оксида возрастает, как и в случае использования метановоздушной смеси.

Рассмотрим каким образом меняется теплотворная способность бензовоздушной смеси при добавке водорода, рис. 3.1.4.

График показывает, при добавлении водорода незначительно уменьшается теплотворная способность смеси. Самые большие изменения отмечаются в обогащенной части смеси. При коэффициенте избытка воздуха, равного 0,9 водород, добавляемый в количестве 5 % от массы метана, приводит к уменьшению теплоты сгорания около 1,7%.

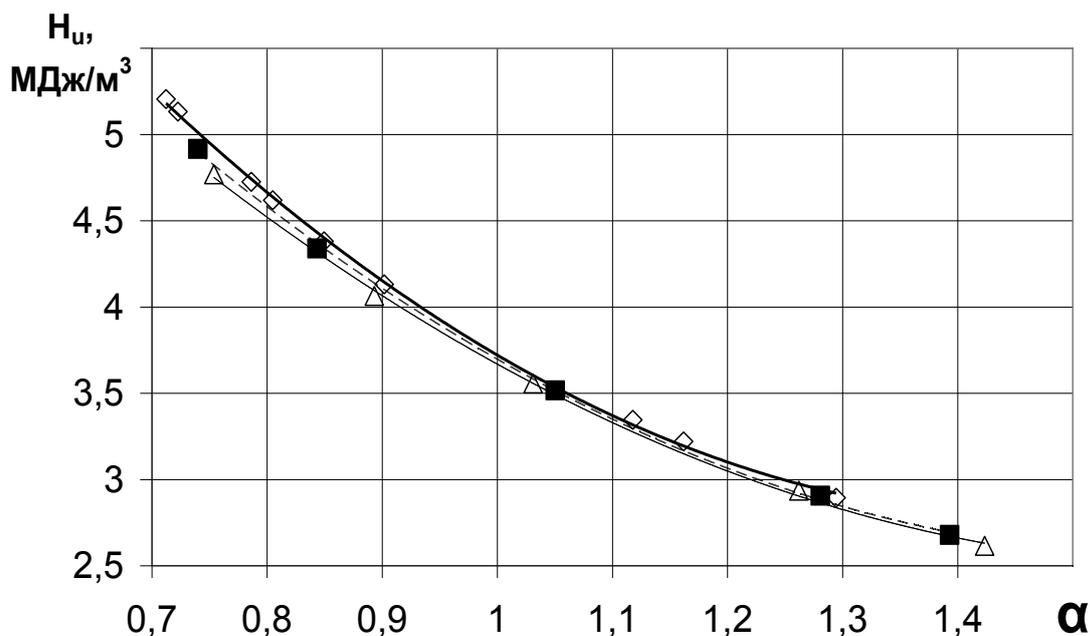


Рисунок 3.1.4 – Низшая теплотворная способность ТВС при добавке водорода  
 Добавка водорода по массе:  $\diamond$ -0%;  $\blacksquare$ -3%;  $\triangle$ -5%

Причиной является то, что газообразный водород обладает самой малой плотностью среди газов и стехиометрическая смесь водорода с воздухом содержит 29,6%  $H_2$  по объёму, а объёмная доля бензина в такой же по составу смеси равна 1,7%.

В этом скрывается причина более низкого значения теплоты сгорания смеси водорода с воздухом, на 15% меньше при стехиометрии, чем при сгорании бензина.

Высокие уровни величин концентрации оксида азота приблизительно одинакового уровня при небольшой разнице теплотворной смеси с использованием бензина в качестве топлива предполагает наличие других факторов, определяющих количество выделений оксида азота при сгорании в ДВС.

Комплексом таких параметров являются характеристики распространения пламени – скорость распространения пламени, ширина зоны горения и время сгорания ТВС в основной фазе.

### **3.2 Изменение видимой средней скорости распространения пламени по составу газовой смеси при изменении физико-химического состава топлива**

Рассмотрим, каким образом происходит изменение средней скорости распространения пламени в пределах основной фазы сгорания при использовании добавки водорода в бензовоздушную и метановоздушную смесь.

Безусловно основным показателем, характеризующим протекание рабочего процесса в поршневом ДВС, а именно токсичность и эффективность, является величина скорости сгорания [38]. При обработке результатов экспериментальных исследований были определены промежутки времени протекания процессов сгорания в первой и второй фазах, когда очаг пламени формируется у свечи зажигания, первая фаза, и после этого пламя завершает своё распространение во всём объеме камеры сгорания.

Характеристики изменения средней скорости распространения пламени метановоздушной смеси по её составу, при изменении доли газообразного водорода, добавляемого в нее и скоростных режимов показаны на рисунках 3.2.1 и 3.2.2.

Увеличение скорости вращения коленчатого вала с 600 до 900 об/мин влечет за собой увеличение скорости распространения пламени как в первой так и во второй фазах. Например, возрастание величины скорости в пределах первой фазы ( $U_1$ ) для стехиометрической смеси,  $\alpha=1$ , составило 22%, при дальнейшем развитии процесса сгорания во второй фазе ( $U_2$ ) 17%. Увеличение коэффициента избытка воздуха до  $\alpha=1,3$  заметно снизило влияние скоростного режима - прирост скорости в первой фазе составил 8% и лишь 7% для второй фазы. Объяснение этого результата заключается в заметном уменьшении нормальной скорости распространения пламени при уменьшении коэффициента избытка воздуха, которое полностью не компенсируется возрастанием турбулентности при росте скоростного режима.

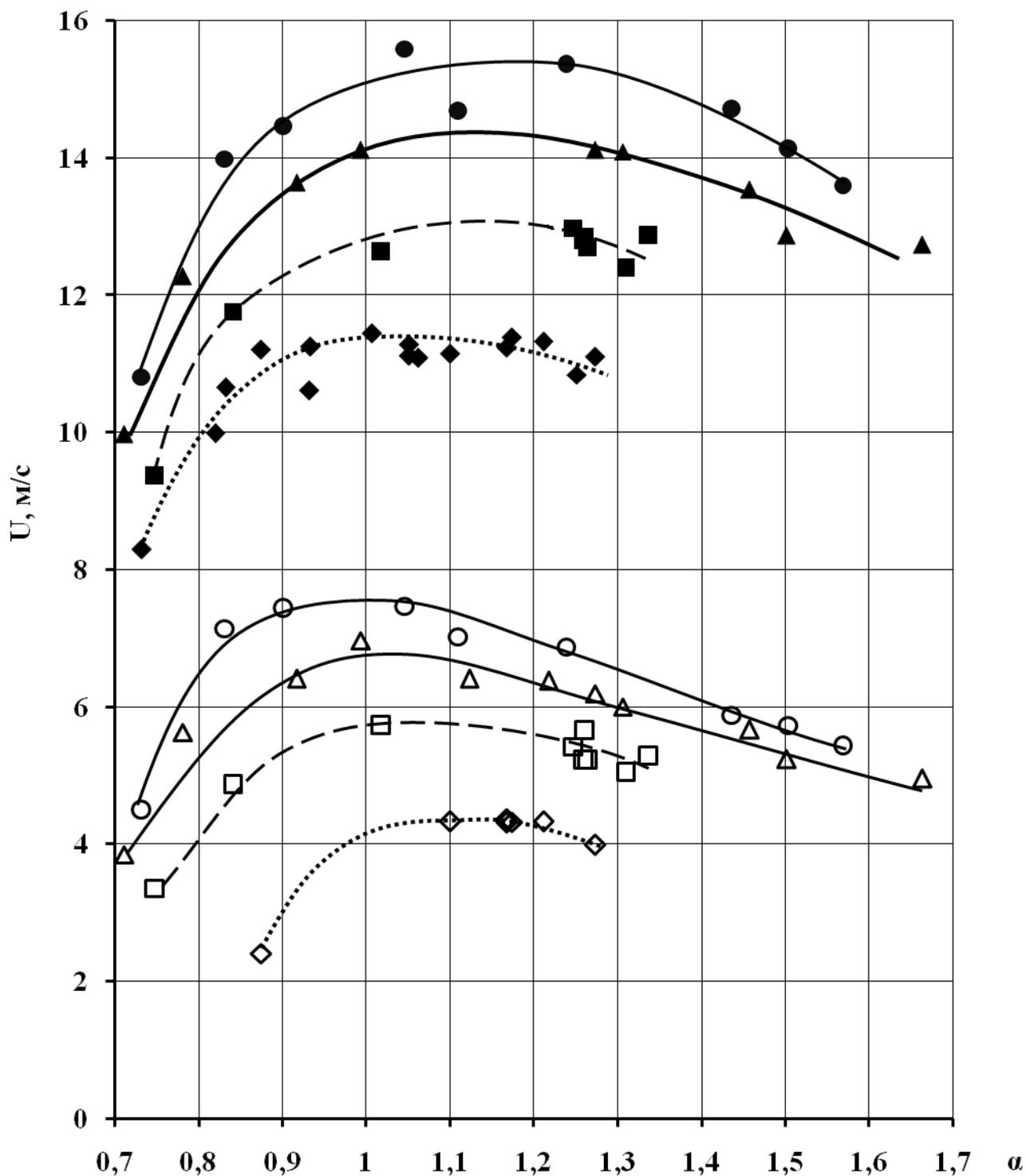


Рисунок 3.2.1 –Средняя скорость распространения метановоздушного пламени от состава смеси и количества водорода, добавляемого в неё ( $n_{\text{квд}} = 600$  об/мин), где  $U_1$ :  $\diamond$ ,  $\square$ ,  $\Delta$ ,  $\circ$ ;  $U_2$ :  $\blacklozenge$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ;  
 $r_{\text{H}_2}=0\%$ :  $\diamond$ ,  $\blacklozenge$ ;  $r_{\text{H}_2}=29\%$ :  $\square$ ,  $\blacksquare$ ;  $r_{\text{H}_2}=47\%$ :  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$ ;  $r_{\text{H}_2}=58\%$ :  $\circ$ ,  $\bullet$ .

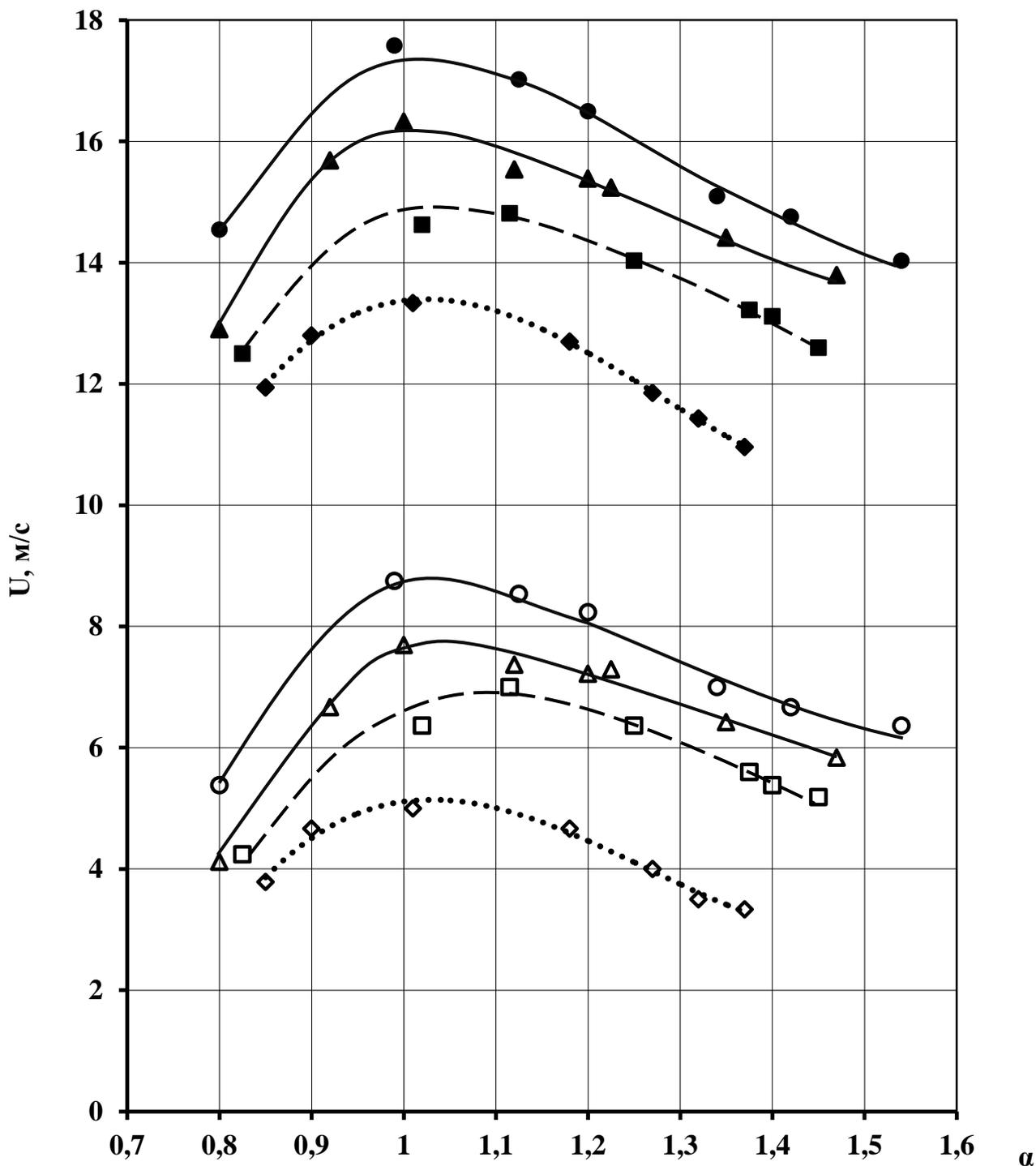


Рисунок 3.2.2 - Средняя скорость распространения метановоздушного пламени от состава смеси и количества водорода, добавляемого в неё водорода ( $n_{\text{КВД}} = 900$  об/мин), где  $U_1$ :  $\diamond$ ,  $\square$ ,  $\Delta$ ,  $\circ$ ;  $U_2$ :  $\blacklozenge$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ;  $r_{H_2}=0\%$ :  $\diamond$ ,  $\blacklozenge$ ;  $r_{H_2}=29\%$ :  $\square$ ,  $\blacksquare$ ;  $r_{H_2}=47\%$ :  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$ ;  $r_{H_2}=58\%$ :  $\circ$ ,  $\bullet$ .

Результаты исследования, представленные на рисунках 3.2.1 и 3.2.2, показывают, что возрастание скоростных режимов вызывает рост средней скорости распространения метановодородовоздушного пламени для всех добавок водорода: 29, 47 и 58%. Для всех режимов исследований зависимость скорости распространения пламени от состава смеси подчиняется квадратичному закону.

Увеличение скорости перемещения пламени при добавлении водорода в газоздушную смесь по отношению к величине скорости без добавки водорода представлено на рисунках 3.2.3 и 3.2.4.

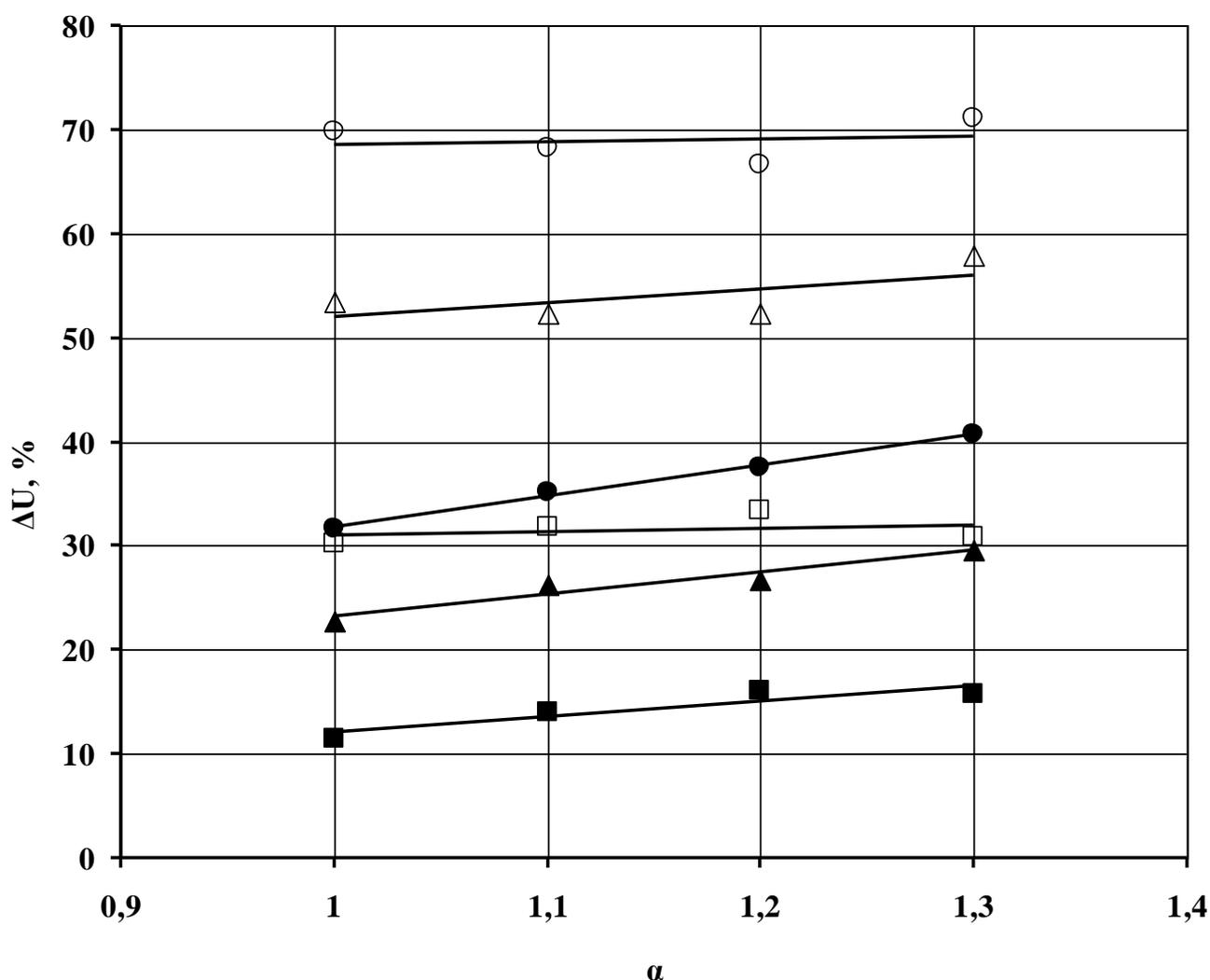


Рисунок 3.2.3 – Прирост скорости распространения пламени по составу ТВС и объемной доле водорода ( $n_{КВД}=600$  об/мин)

$\Delta U_1$ : □, Δ, ○;  $\Delta U_2$ : ■, ▲, ●;  $r_{H_2}=29\%$ : □, ■;  $r_{H_2}=47\%$ : Δ, ▲;  $r_{H_2}=58\%$ : ○, ●.

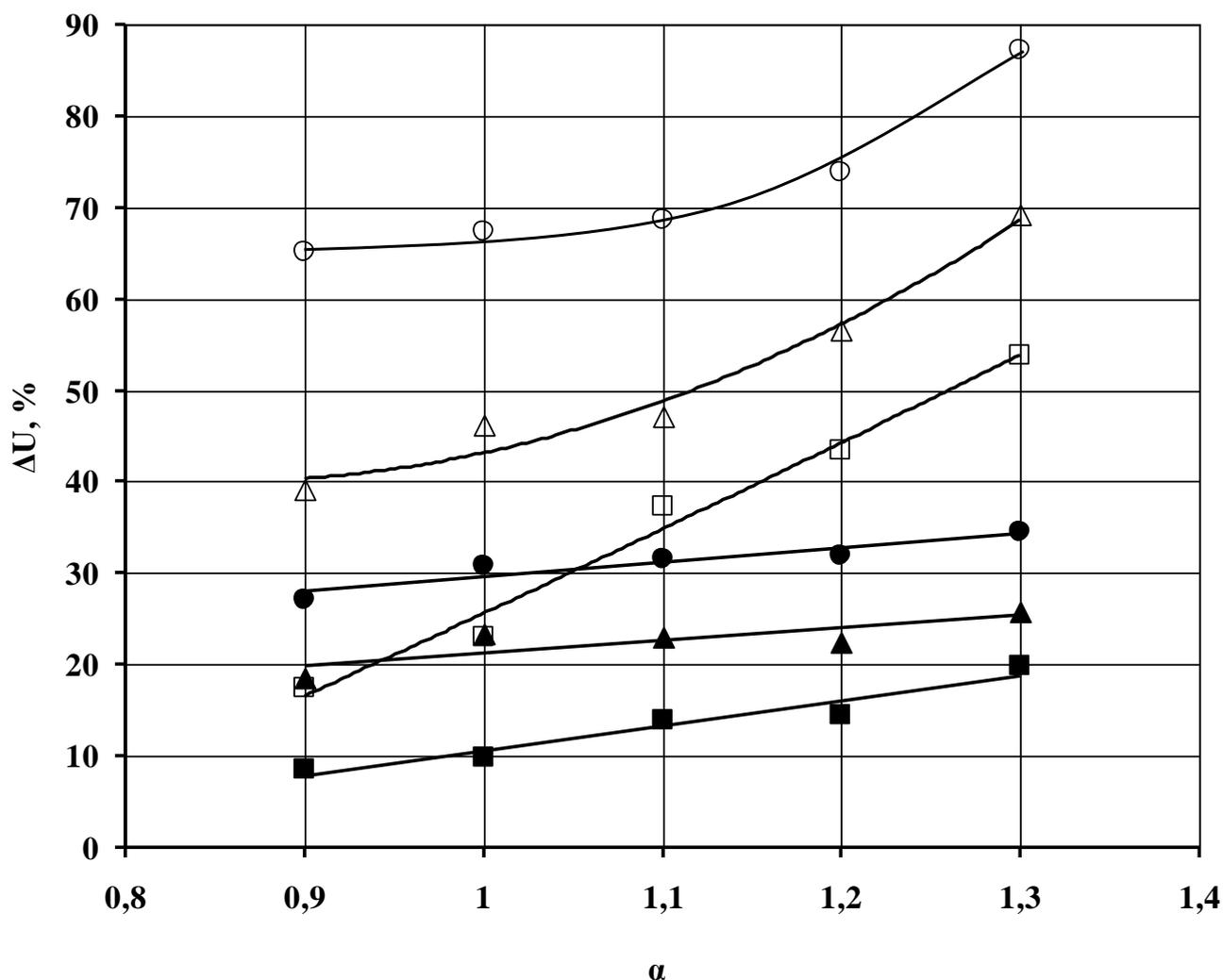


Рисунок 3.2.4 – Прирост скорости распространения пламени по составу ТВС и объемной доле водорода ( $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин)

$\Delta U_1$ : □, Δ, ○;  $\Delta U_2$ : ■, ▲, ●;  $r_{\text{H}_2}=29\%$ : □, ■;  $r_{\text{H}_2}=47\%$ : Δ, ▲;  $r_{\text{H}_2}=58\%$ : ○, ●.

Наибольший прирост скорости распространения пламени существует в первой фазе сгорания. При обеднении ТВС и большем количестве добавки водорода прирост скорости становится интенсивнее. При коэффициенте избытка воздуха, равном 1,3, для первой фазы сгорания, при добавке 29%  $\text{H}_2$  увеличение средней скорости распространения пламени составляет 53% ( $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин) и 30% ( $n_{\text{КВД}}=600$  об/мин). Для стехиометрического состава смеси,  $\alpha=1$ , прирост скорости  $U_1$  достигает 23% ( $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин) и 30% ( $n_{\text{КВД}}=600$  об/мин).

Что касается процессов горения во второй фазе, то для бедной смеси,  $\alpha=1,3$ , добавка того же самого количества водорода, 29%, повышает скорость горения на 20% ( $n_{\text{КВД}} = 900$  об/мин) и на 15% ( $n_{\text{КВД}} = 600$  об/мин), а для стехиометрического состава смеси,  $\alpha=1$ , прирост скорости  $U_2$  составил 10 % ( $n_{\text{КВД}} = 900$  об/мин) и 11% ( $n_{\text{КВД}} = 600$  об/мин).

Отмеченный эффект воздействия активатора горения – водорода на процесс сгорания углеводородной смеси объясняется ростом содержания молекулярного водорода, который в качестве активных центров играют определяющую роль в распространении пламени. Следовательно, наличие газообразного водорода в ТВС создаёт необходимые условия для образования дополнительных активных химических центров, что снижает требуемую энергию воспламенения и расширяет пределы устойчивого горения.

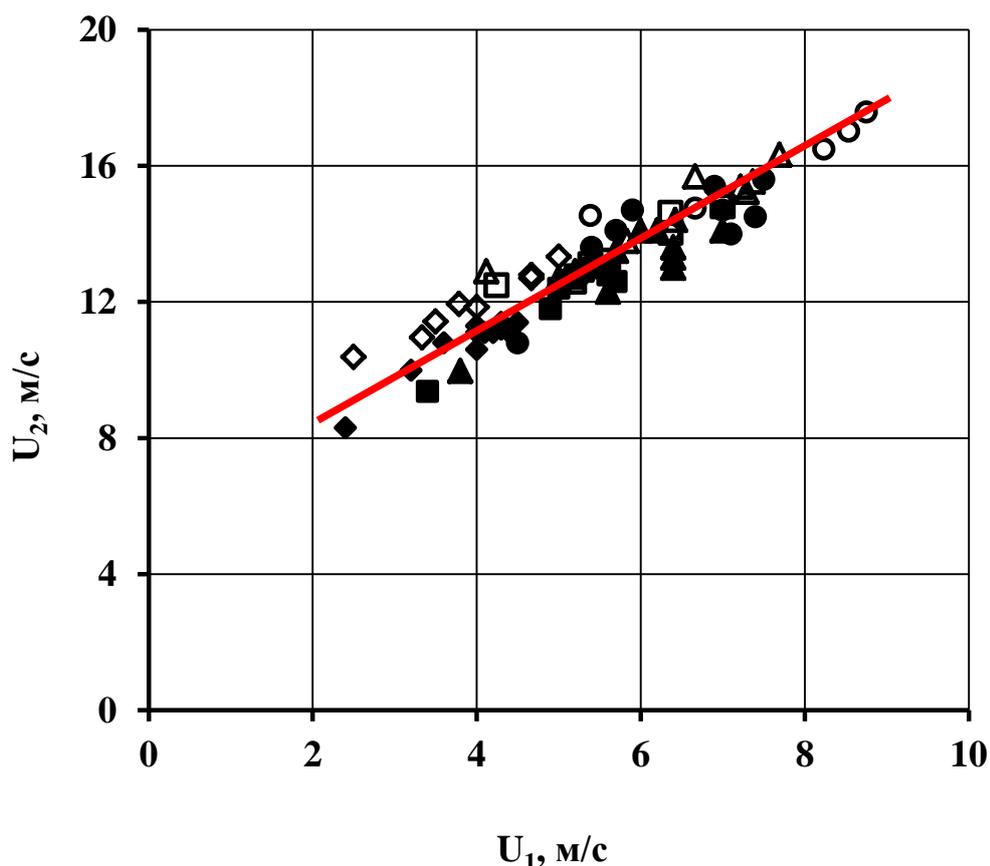


Рисунок 3.2.5 –Взаимосвязь скорости распространения пламени во второй фазе со скоростью в первой фазе сгорания, где  $n_{\text{КВД}}=600$  об/мин:  $\blacklozenge$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ;  
 $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин:  $\diamond$ ,  $\square$ ,  $\Delta$ ,  $\circ$ ;  $r_{\text{H}_2}=0\%$ :  $\diamond$ ,  $\blacklozenge$ ;  $r_{\text{H}_2}=29\%$ :  $\square$ ,  $\blacksquare$ ;  $r_{\text{H}_2}=47\%$ :  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$ ;  
 $r_{\text{H}_2}=58\%$ :  $\circ$ ,  $\bullet$ .

На рисунке 3.2.5 показано изменение скорости в начальной фазе сгорания и развитие скорости во второй фазе сгорания.

Анализ результатов исследования, рассматриваемых в данном разделе, показали существование линейной зависимости, связывающей скорость пламени во второй фазе сгорания со скоростью в первой фазе сгорания. Эта зависимость справедлива во всём диапазоне исследуемых скоростных режимов, составов смеси количества водорода, добавляемого в топливно-воздушную смесь. Получено, что рост скорости  $U_1$  сопровождается ростом скорости  $U_2$ . Следовательно, характер протекания химико-физических процессов в первой фазе сгорания топлива оказывает влияние на протекание химических реакций горения и, через них, на  $U_2$ , чем и определяется её значение.

Таким образом, знание о характере и величине скорости распространения пламени в первой фазе сгорания даёт основания для оценки развития скорости и для второй фазы сгорания.

Проведенный анализ результатов исследования позволяет сделать важное предположение о возможности проводить предварительную оценку величины скорости распространения пламени во второй фазе сгорания по результатам измерения ионного тока в цепи одного ИД, расположенного вблизи свечи зажигания.

### **3.3 Анализ распространения пламени с видимой средней скоростью в основной фазе сгорания в зависимости от состава смеси с добавкой газообразного водорода в бензовоздушную смесь**

Проанализируем результаты испытаний по определению характера протекания видимой скорости распространения пламени при изменении режимных параметров работы двигателя: состава смеси, скоростного режима

работы, угла опережения зажигания и физико-химических свойств топливно-воздушной смеси.

Эти результаты представлены на рисунке 3.3.1 в виде зависимости средней скорости перемещения пламени при изменении коэффициента избытка воздуха ТВС. Рост скоростного режима, состав ТВС и УОЗ поддерживаются постоянными, вызывает увеличение величины средней скорости распространения пламени. В качестве примера рассмотрим результаты для двух значений коэффициентов избытка воздуха: стехиометрический состав,  $\alpha = 1$ , и бедная смесь,  $\alpha = 1.2$ . При росте скоростного режима с  $600\text{min}^{-1}$  до  $900\text{min}^{-1}$  для  $\alpha = 1$  произошло увеличение средней скорости распространения пламени с  $U = 12,5$  м/с ( $\theta_3 = 13^\circ$  пкв) до  $U = 17$  м/с ( $\theta_3 = 13^\circ$  пкв). Приращение средней скорости пламени для основной фазы составило 36 %. В испытаниях для бедной смеси,  $\alpha = 1.2$ , получена средняя скорость  $U = 8,5$  м/с ( $n = 600\text{min}^{-1}$ ,  $\theta_3 = 13^\circ$  пкв) и  $U = 10$  м/с ( $n = 900\text{min}^{-1}$ ,  $\theta_3 = 13^\circ$  пкв), то есть величина скорости увеличилась около 17 %.

Полученный эффект обусловлен двумя причинами: увеличением турбулентной составляющей скорости за счёт роста пульсационной скорости при росте скоростного режима и уменьшением нормальной скорости при обеднении смеси.

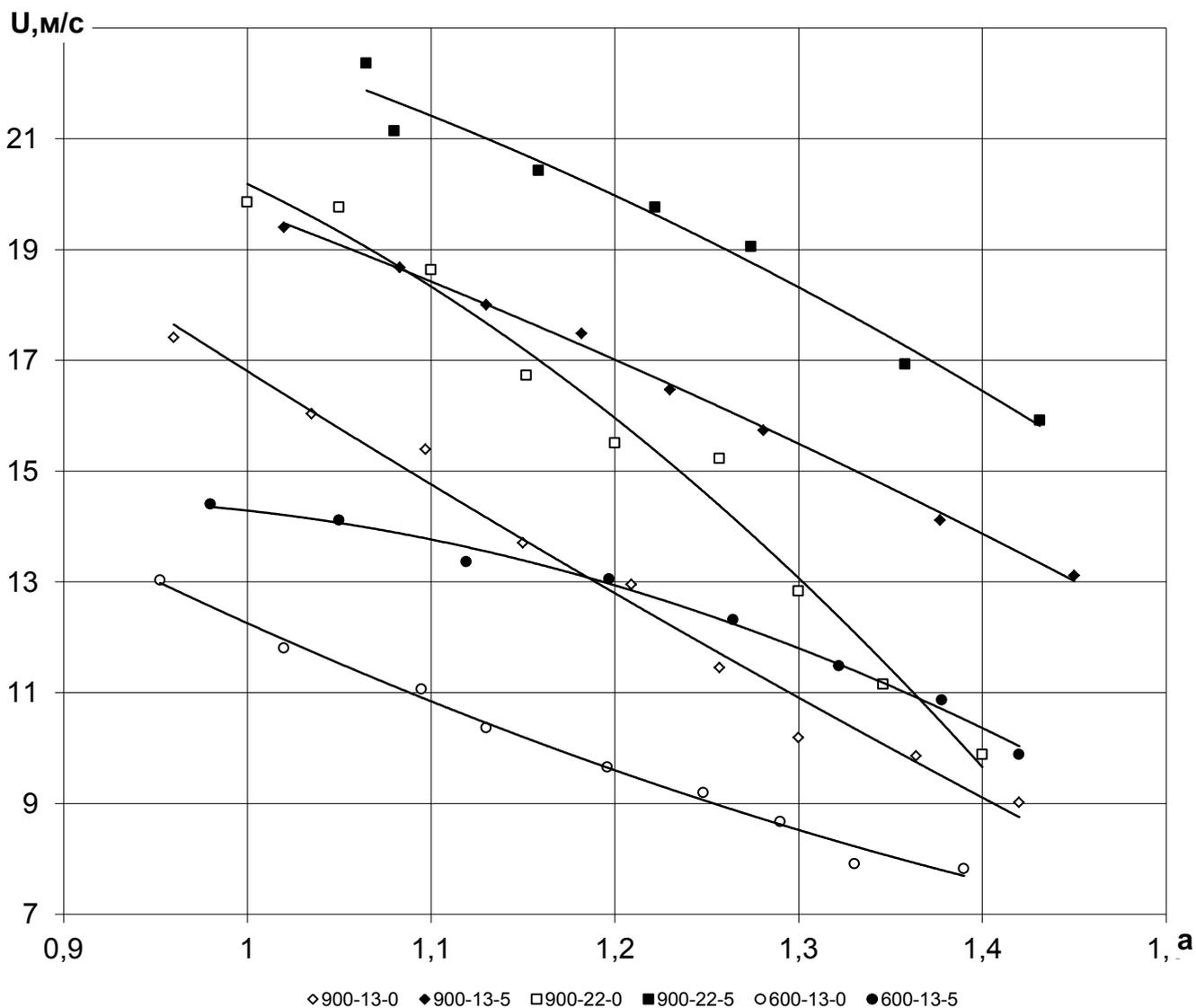


Рисунок 3.3.1 – Видимая средняя скорость распространения пламени в основной фазе по составу ТВС с добавкой водорода

По представленным на рис. 3.3.1 результатам произведём оценку влияния угла опережения зажигания (УОЗ) на характер распространения пламени. Теория рабочего процесса поршневых бензиновых двигателей с искровым зажиганием утверждает, что УОЗ является одним из важнейших параметров для протекания процесса сгорания. Причём определено, что для каждого режима работы ДВС существует свой оптимальный УОЗ, обеспечивающий протекание процессов сгорания основной фазы непосредственно у верхней мертвой точке (ВМТ). При такой реализации процесса сгорания во второй фазе площадь действительной индикаторной

диаграммы, оценивающая индикаторную работу, наиболее близко соответствует теоретической площади. В этом случае ДВС эксплуатируется в условиях, обеспечивающих достижение наиболее высокой эффективности.

Во второй главе указано, что в конструкции экспериментальной установки предусмотрена возможность изменять угол опережения зажигания. Указанная возможность позволяет экспериментально определять влияние изменения УОЗ на величину видимой средней скорости пламени.

Результаты экспериментов по оценке воздействия изменения УОЗ на среднюю скорость распространения пламени представлены также на рисунке 3.3.1. При увеличении УОЗ с угла  $\theta_3 = 13^\circ$  пкв до  $\theta_3 = 22^\circ$  пкв, и поддержании постоянного скоростного режима ( $n = 900 \text{ min}^{-1}$ ) для всех исследуемых составов ТВС и в независимости от количества добавки водорода происходит возрастание видимой средней скорости распространения пламени на 17 %. Основная причина такого воздействия заключается в перемещении основной фазы сгорания в область более высоких давлений сжатия и, следовательно, более высокой начальной температуры, от которой нормальная скорость распространения пламени зависит в степени 1,6-1,8. Рост нормальной скорости распространения пламени вызывает, в свою очередь, рост турбулентной скорости [15,18,24].

#### **3.4 Сравнение скоростей распространения пламени при добавке водорода в метановоздушную и бензовоздушную смесь**

Данные по изменению скоростей распространения пламени в основной зоне сгорания для скоростного режима 900об/мин сведены в таблицу (метановоздушная смесь и бензовоздушная смесь).

Результаты, представленные в таблице, показывают, что при использовании бензовоздушной смеси по сравнению с метановоздушной скоростью распространения пламени в основной фазе сгорания существенно выше во всём исследованном диапазоне.

Таблица Скорость распространения пламени, м/сек

H, $\alpha$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
0, CH <sub>4</sub>	13,3	13,2	12,5	11,5	
0, бензин	20	18,5	16	13	10
29, CH <sub>4</sub>	14,8	14,8	14,3	13,8	13
3, бензин	-	-	-	-	-
47, CH <sub>4</sub>	16,1	16	15,3	14,7	14
5, бензин	22,5	21,5	20	18	16,5

Для максимальных концентраций NO в области коэффициентов избытка воздуха 1,1 и 1,2 без добавки водорода скорость распространения пламени у бензовоздушной смеси на 5,3м/с (40%) и 3,5м/с (28%) выше, соответственно.

При добавке 5% (по массе от бензина), что эквивалентно 47% по объёму для CH<sub>4</sub> увеличение скорости распространения пламени при использовании бензина составит, соответственно, 5,5м/с (34%) и 4,7м/с (31%).

Увеличение скорости распространения пламени в основной фазе сгорания позволяет завершить процесс сгорания за меньший промежуток времени при меньшем объёме, что приведёт и к повышению температуры отработавших газов, и к увеличению временного промежутка взаимодействия кислорода и азота при максимальной температуре.

Таким образом основная роль при добавке водорода в топливно-воздушную смесь в увеличении концентрации оксида азота определяется ростом скорости сгорания ТВС в основной фазе сгорания.

### **3.5 Модель сгорания топливно-воздушной смеси, однородной по составу и фазе, в поршневом двигателе с искровым зажиганием при добавке химического активатора горения (водорода)**

Модель распространения пламени в камере сгорания переменного объема представлена на рис. 3.1, на котором схематически показаны схемы зон горения в камере сгорания, 1, для двух положений I и II поршня, 2,.

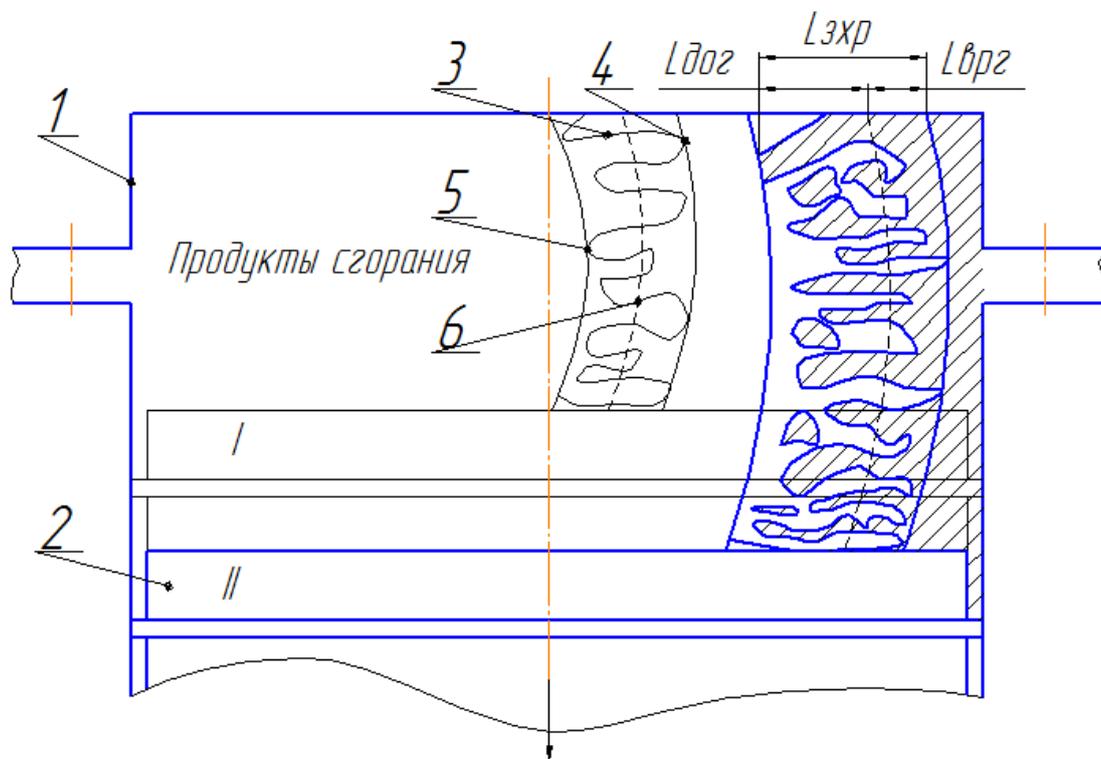


Рис. 3.5.1 – Модель распространения пламени в камере сгорания переменного объема,

1- камера сгорания; 2 – поршень; 3 – фронт ламинарного пламени; 4 – передняя граница зоны горения; 5 – задняя граница зоны горения; 6 – линия положения максимальной интенсивности химических реакций;  $L_{врг}$  – протяженность зоны воспламенения и развития химических реакций;  $L_{дог}$  – протяженность зоны догорания;  $L_{зхр}$  – протяженность зоны горения.

При сгорании однородной по составу и фазе топливно-воздушной смеси в условиях двигателя с искровым зажиганием пламя из зоны у свечи зажигания распространяется с ускорением по турбулентному механизму при увеличении ширина зоны турбулентного горения,  $L_{зхр}$ , которая своего максимума достигает при приближении к стенкам цилиндра. Зона горения включает в себя непрерывный, сильно искривленный турбулентными пульсациями фронт ламинарного пламени, 3. По результатам данной работы

можно допустить, что ширина горения ламинарного фронта пламени в исследованных условиях заметно меньше 1мм. Между изгибами ламинарного фронта пламени, со стороны сгоревшей смеси находятся продукты сгорания, с другой стороны – свежая топливно-воздушная смесь. В зоне турбулентного горения химические реакции окисления топлива начинаются с появления ионного тока, на определенном расстоянии от переднего фронта пламени, линия 4, интенсивность протекания химических реакций горения достигает максимума, линия 6, (соответствует достижению максимума ионного тока), после чего скорость протекания химических реакций уменьшается до нуля у задней границы, 5. Зона горения по интенсивности протекания химических реакций делится на две части: зону воспламенения и развития химических реакций горения,  $L_{ЗРГ}$ , и зону догорания,  $L_{дог}$ . Границей между этими зонами служит линия достижения максимума ионного тока пламени, 6. Расположение максимума химических реакций, 6, в зоне горения относительно переднего фронта турбулентного пламени, 5, практически не зависит от режимных параметров работы двигателя, состава смеси и количества добавляемого активатора горения. Изменение ширины зоны горения происходит за положением максимума химических реакций, а именно, при обеднении смеси относительно стехиометрического состава или обогащении при коэффициенте избытка воздуха менее 0,9, а также при возрастании скоростного режима протяженность зоны догорания,  $L_{дог}$ , увеличивается.

На рис.3.5.2 показаны изменения, происходящие в зоне турбулентного горения при добавке водорода в топливно-воздушную смесь.

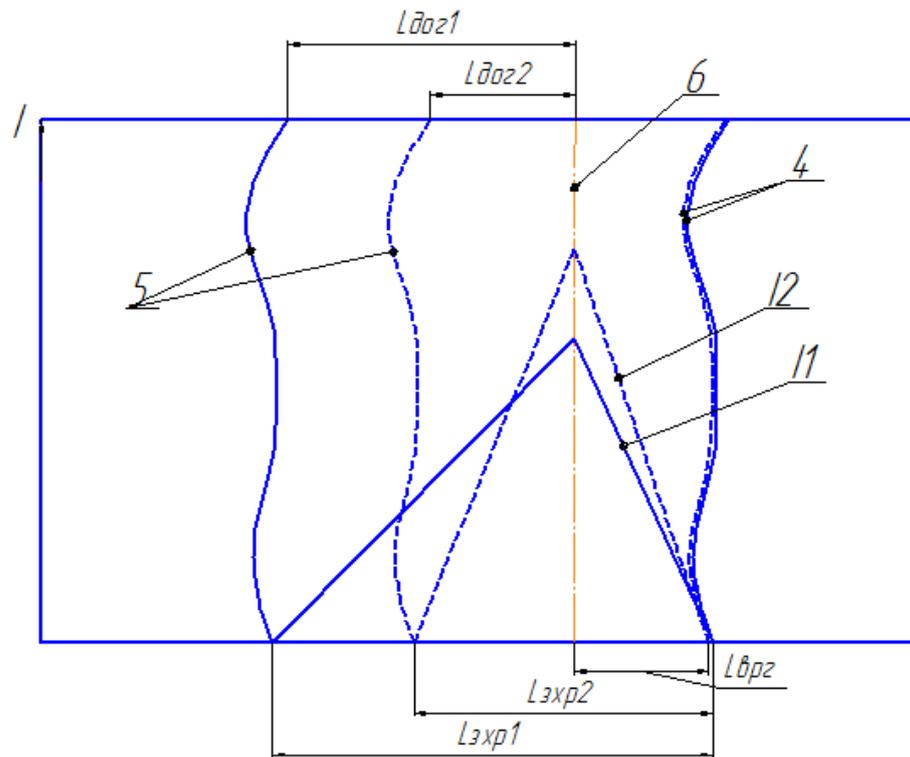


Рис. 3.5.2 – Распределение ионного тока по ширине зоны химических реакций (обозначения см. рис. 3.5.1)

Добавка химического активатора горения, например водорода, вызывает увеличение интенсивности химических реакций в зоне горения,  $L_{зхр}$ , (сопровождается ростом амплитуды ионного тока,  $I_2 > I_1$ ) и уменьшение ее ширины,  $L_{зхр}$ , за счет части зоны догорания,  $L_{дог}$ , за положением максимума ионного тока. Интенсификация химических реакций и в зоне воспламенения и развития химических реакций,  $L_{зрг}$ , и в зоне догорания,  $L_{дог}$ , приводит к увеличению нормальной скорости распространения пламени и, соответственно, возрастанию турбулентной скорости, что приводит к завершению процесса сгорания ТВС при меньшем объеме камеры сгорания и, следовательно, при более высокой температуре и давлении. При этом сокращается время горения отдельных молей свежей ТВС, проникающих в продукты сгорания, за фронт ламинарного пламени, и они успевают сгореть с поверхности за время их существования.

При достижении передней границы зоны горения стенки камеры сгорания (стенки цилиндра двигателя или энергетической установки) при использовании химического активатора горения интенсивность химических реакций горения выше, а протяженность зоны догорания меньше по сравнению со сгоранием ТВС без активирующих добавок. Итогом такого изменения процесса распространения пламени является уменьшение толщины и площади поверхности пристеночных слоев, в которых горение прекращается и остаются несгоревшие углеводороды.

Таким образом добавка химического активатора горения за счет увеличения нормальной и турбулентной скорости распространения пламени и сокращения зоны горения приводит к более полному сгоранию ТВС и в объеме камеры сгорания, и в пристеночных слоях за более короткий промежуток времени при меньшем объеме, больших значениях температуры и давления, что обеспечивает повышение эффективности работы энергетических установок и снижение концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах.

С другой стороны указанные эффекты, а именно завершение сгорания за более короткий промежуток времени при более высокой температуре, способствуют увеличению концентрации оксидов азота в продуктах сгорания.

#### **4 Обобщение результатов исследования**

Обобщение результатов исследования по теме диссертации основывалось на полученных экспериментальных данных по взаимосвязи характеристик горения с режимными параметрами работы двигателя, их изменении при добавке химического регулятора горения в ТВС – газообразного водорода, а также связи характеристик горения с концентрацией вредных выделений по оксиду азота. При обобщении и выводе эмпирических зависимостей проводилось сопоставление результатов

экспериментов с известными опубликованными данными и фундаментальными положениями теории горения и образования вредных выделений.

Представим для наглядности результаты при использовании метана и бензина на одном графике, рис. 4.1.1.

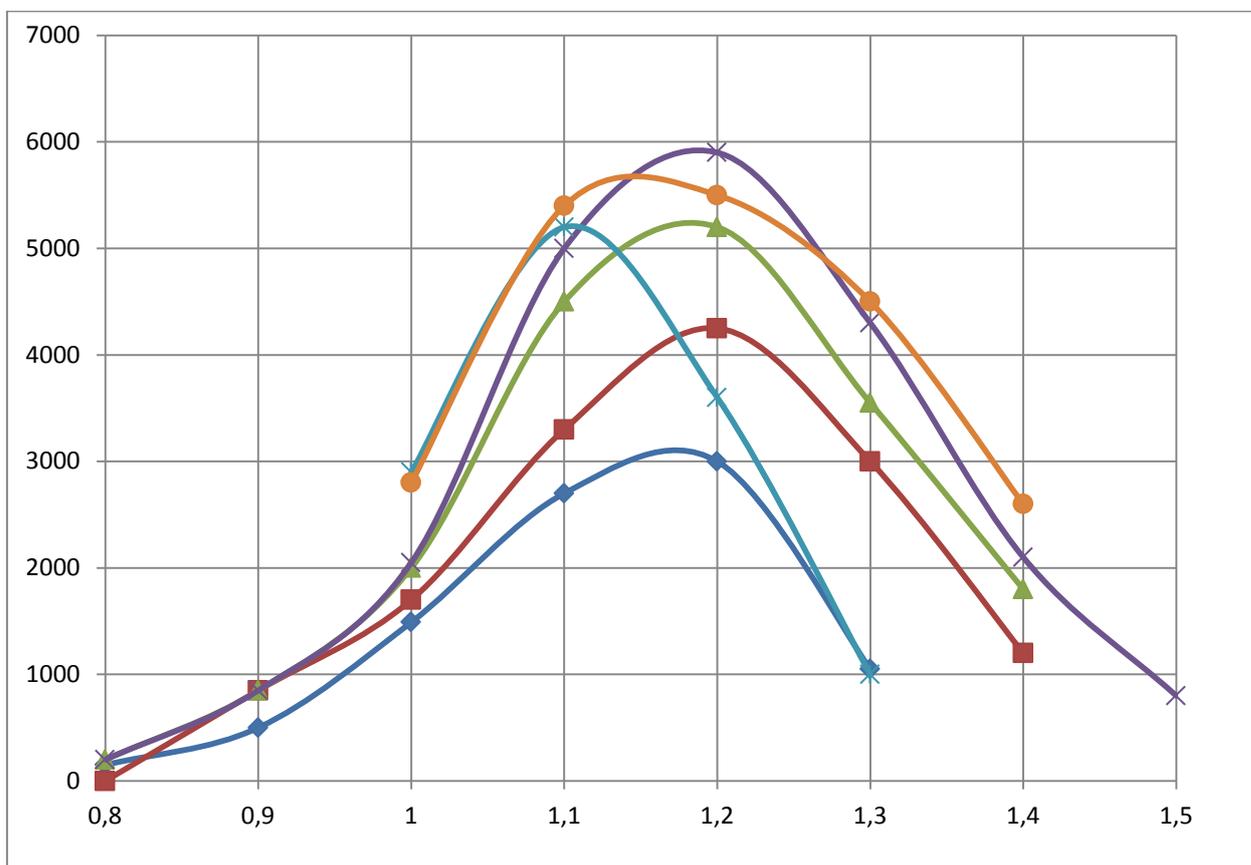


Рисунок 4.1.1 Концентрация оксида азота при использовании метановоздушной и бензовоздушной смеси с добавкой водорода УОЗ,  $\theta_z=21^\circ$  пкв, степень сжатия  $\epsilon=7$ ,  $n=900$

Метан  $g_{H_2}$ : ◆=0%, ■=5%, ▲=10%, X=15%; Бензин  $g_{H_2}$ : \*=0%, ●=5%

Представленные зависимости показывают, что уровень концентрации NO в отработавших газах при использовании бензина существенно выше, чем для метана. Одной из причин полученного эффекта является более высокая теплотворная способность бензина по сравнению с метаном.

Необходимо отметить, что при использовании метановоздушной смеси при одинаковой добавке водорода прирост концентрации NO значительно выше, чем при добавке водорода в бензовоздушную смесь. Так,

максимальное увеличение концентрации NO при добавке водорода 5% для метана составило 1100ppm (35%), а для бензина 700ppm (14%). Отмеченная особенность объясняется ростом теплотворной способности при добавке водорода в метановоздушную смесь и неизменностью теплотворной способности при добавке водорода в бензовоздушную смесь.

Существует несколько математических моделей, с помощью которых, с той или иной степенью точности, определяются характеристики работы тепловых поршневых двигателей, в том числе показатели эффективности работы и токсичности ОГ. Как было показано в первой главе сходимость расчётных и экспериментальных данных при использовании этих моделей по отношению к выделениям оксида азота далеко не адекватна.

. В представленной диссертации при использовании результатов большого количества проведенных экспериментов [32, 33, 34] предложена эмпирическая модель для оценки концентрации оксидов азота в продуктах сгорания тепловых поршневых двигателей и установок.

В монографии [35] предлагается приближенно оценивать концентрацию оксидов азота по математическим зависимостям, основанных на механизме, предложенным Я.Б. Зельдовичем []:

$$\frac{d[NO]}{d\tau} = 1.28 \cdot 10^{10} T^{0.0472} [P_2]^{0.75} [N_2] \exp\left(-\frac{68376}{T}\right), \quad (4.1)$$

$$[NO] = 4.7 \cdot 10^9 \exp\left(-\frac{36656}{T_{max}}\right), \quad (4.2)$$

где  $[O_2]$  – концентрация кислорода;  $[N_2]$  – концентрация азота;  $T$  – температура продуктов сгорания.

В этих выражениях, согласно известным положениям, образование  $NO_x$  определяется температурой газа за зоной горения и зависимость концентрации  $NO_x$  в ОГ является экспоненциальной. Выделение  $NO_x$ , в меньшей степени зависит от концентрации молекул кислорода. Эта зависимость пропорциональна корню квадратному от концентрации молекул кислорода. Выделение  $NO_x$  пропорционально концентрации молекул азота. А

Автор [32] отмечает, что оценка концентрации оксидов азота по этим выражениям, носит весьма приближённый характер и расчётные величины являются завышенными по сравнению с действительными.

Объяснение лежит в том, что при расчётах не учитывались реакции обратной диссоциации молекул оксидов азота, характерных для расширенного механизма Я.Б. Зельдовича, которые действительности ограничивают процесс образования оксидов азота. В этих моделях не принимается во внимание время, необходимое для полного протекания реакций образования NO, а также характер изменения времени при охлаждении продуктов сгорания в процессе расширения, когда осуществляется так называемый процесс «закалки». В предложенных не производится сравнение времени, необходимого для полного протекания реакций образования NO и времени пребывания азота и кислорода в зоне при высокой температуре. Эти различия являются определяющими для тепловых поршневых двигателей, в которых в течение нескольких миллисекунд изменяются давление, объём и температура.

Время протекания основной фазы сгорания и её расположение относительно верхней мёртвой точки в основном определяются характером распространения пламени. Согласно известным законам концентрация NO<sub>x</sub> определяется количеством кислорода в продуктах сгорания, температурой отработавших газов и временем нахождения кислорода и азота в области максимальной температуры. Одним из параметров, определяющих температуру продуктов сгорания, является коэффициент избытка воздуха. Эта зависимость является обратно пропорциональной в степени  $n$  ( $n$  – эмпирический коэффициент):

$$T_{п.с.} \sim 1/\alpha^n. \quad (4.3)$$

Положение основной зоны относительно верхней мёртвой точки и значение температуры продуктов сгорания зависит и от угла опережения зажигания, а также от объёма отработавших газов при завершении сгорания в основной фазе и временем протекания сгорания в основной фазе:

$$T_{п.с.маx} \sim \theta_{0.3}; T_{п.с.маx} \sim V_a - V_{сг} \sim \tau_{сг}, \quad (4.4)$$

где  $V_a$  – полный объём цилиндра,  $\theta_{0.3}$  – УОЗ.

Продолжительность нахождения азота и кислорода в объёме продуктов сгорания при максимальной температуре определяет время, затраченное на процесс сгорания, представленное в виде:

$$\tau_{преб.} \sim \tau_{сг.} \quad (4.5)$$

Содержание в ОГ оксида азота определяется пропорционально корню квадратному из концентрации атомарного кислорода. В свою очередь концентрация атомарного кислорода зависит от коэффициента избытка воздуха. Тогда:

$$[NO_x] \sim [O]^{0.5} \sim \alpha^{0.5}. \quad (4.6)$$

Скоростной режим работы двигателя учитывается через среднюю скорость перемещения поршня,  $W_{п.}$

Из анализа параметров, определяющих максимальное значение температуры, содержания свободного кислорода и действительную продолжительность сгорания в основной фазе, получаем совокупность следующих параметров, определяющих концентрацию оксида азота в отработавших газах

$$C_{но} \sim (\alpha^n / \alpha^{0.5}); U_{осн}, W_{п.}, \theta_{0.3.}, V_{Pz}, V_a. \quad (4.7)$$

Составим безразмерный параметр для определения концентрации NO, аналогичный предложенному в [Айрапетян], с учётом рассмотренных выше закономерностей, учитывающих температуру продуктов сгорания, концентрацию свободного кислорода, а также время пребывания кислорода и азота в объёме продуктов сгорания в следующем виде:

$$Ma = \frac{U \cdot \left( \frac{L_M}{D} \right)}{\alpha \cdot \sqrt{\alpha} \cdot W_{п.}^{cp}} \cdot \frac{180 + \Theta_3}{180} \cdot \frac{V_a - V_{3c}}{V_h}$$

где  $U_{осн}$  – средняя скорость распространения пламени,  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха,  $L_M$  – максимальное расстояние от свечи зажигания до самой удаленного участка КС,  $D$  – диаметр цилиндра,  $W_{п.}^{cp}$  – средняя скорость

поршня,  $\theta_3$  – угол опережения зажигания,  $V_a$ ,  $V_{zc}$ ,  $V_h$  – полный, объем завершения сгорания и рабочий объем цилиндра соответственно.

При обобщении результатов экспериментального исследования при сжигании метановоздушной смеси в условиях поршневого двигателя, рассмотрев параметры, определяющие температуру, количество свободного кислорода, располагаемое время процесса сгорания и расширения, изменения объемов работы двигателя, получена эмпирическая зависимость для расчета безразмерного параметра  $Ma$ , определяющего концентрацию NO в отработавших газах, которая в графическом виде представлена на рис 4.1.2

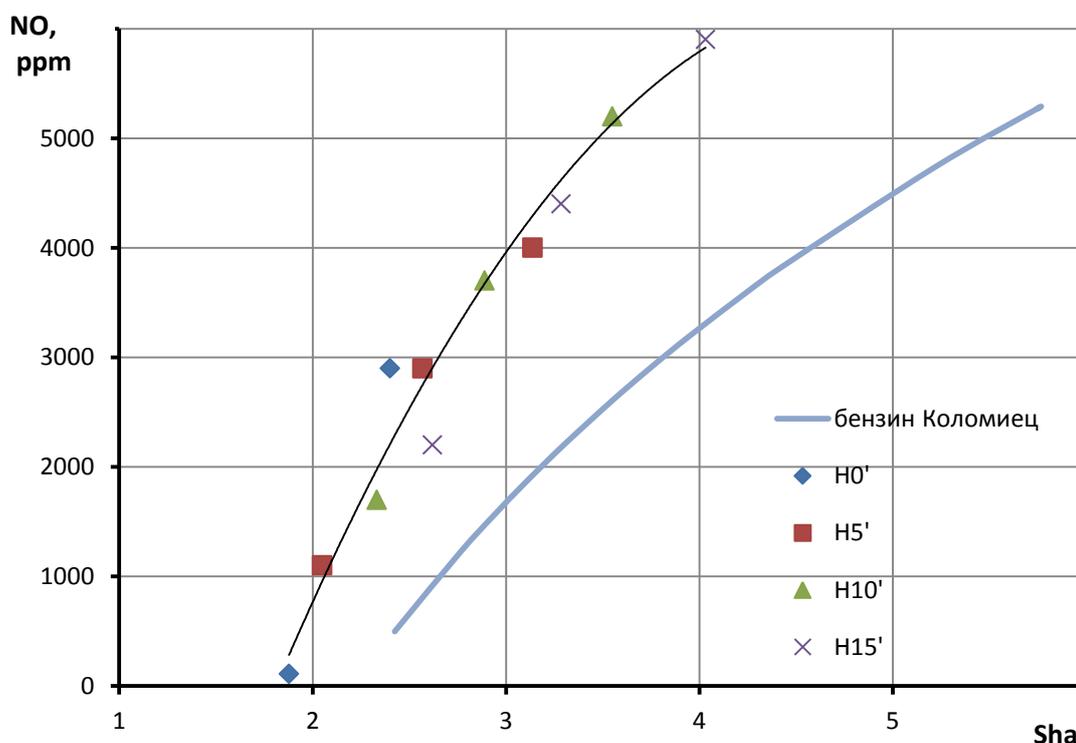


Рисунок 4.1.2 - Диаграмма определения выделений NOx в ОГ по показателю  $C_{no}$

На рисунке 4.1.2 представлены результаты обобщения экспериментальных данных концентрации NO от безразмерного параметра  $Sha$  при различных добавках водорода в метановоздушную смесь. Экспериментальные точки, независимо от количества добавляемого

водорода, с большой степенью точности описываются одной кривой, которая может быть представлена в виде полинома 3-го порядка:

$$\overline{NO_x} = A \cdot Cno^3 + B \cdot Cno^2 + C \cdot Cno + D \quad (4.9)$$

## 4.2 Методика расчётного определения концентрации оксидов азота в процессе проектирования и доводки тепловых поршневых двигателей

Разработанная модель оценки концентрации окислов азота позволила составить расчётную методику, предназначенную для определения количества выделений NO при сгорании метано-водородной смеси.

1 Принимаются для проектируемого ДВС основные параметры двигателя: скоростные режимы работы ( $n$ ), суммарный объём цилиндров ( $V_a$ ), степень сжатия ( $\epsilon$ ).

2 Задают значения оптимальных углов опережения зажигания  $\theta_{o.z}$  и диапазон коэффициентов избытка воздуха,  $\alpha$ .

3 В соответствии с тепловым расчётом (например, по методу И.И. Вибе) определяют значения промежутка времени основной фазы сгорания и объём завершения основной фазы:  $\tau_{cz}$  и  $V_{cz}$ .

4 Производится расчёт безразмерного комплекса параметров для определения концентрации окислов азота по выражению

$$Ma = \frac{U \cdot \left( \frac{L_M}{D} \right)}{\alpha \cdot \sqrt{\alpha} \cdot W_{II}^{cp}} \cdot \frac{180 + \Theta_3}{180} \cdot \frac{V_a - V_{zc}}{V_h} \quad (4.10)$$

5 Согласно определённым предварительно эмпирическим коэффициентам производится определение концентрации  $NO_x$  по выражению

$$\overline{NO_x} = A \cdot K^3 + B \cdot K^2 + C \cdot K + D \quad (4.11)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили решить актуальную научно-техническую задачу в целях расчетного определения концентрации оксидов азота в ОГ тепловых поршневых двигателях. В ходе работы над диссертацией сформулированы следующие основные выводы:

1 На основании результатов экспериментального исследования показано, что основную роль в возрастании концентрации оксида азота при сгорании метановоздушной смеси с добавкой водорода в играют характеристики сгорания ТВС в зависимости от состава смеси, скоростного режима работы и значений углов опережения зажигания.

2 Проведён анализ параметров, определяющих максимальное значение температуры, концентрацию атомарного кислорода и длительность времени нахождения азота и кислорода в зоне продуктов сгорания.

4 Для прогнозирования концентрации  $\text{NO}_x$  в тепловых поршневых двигателях и установках предложена эмпирическая модель, учитывающая добавки водорода в ТВС, при использовании безразмерного комплекса параметров :

$$Ma = \frac{1}{\alpha^{2/3}} \cdot \left( \frac{\tau_{180} - \tau_{Pz}}{\tau_{180}} \right) \cdot \left( \frac{180 - \theta_{o.з.}}{180} \right) \cdot \left( \frac{V_a - V_{Pz}}{V_a} \right).$$

Предложенная модель, при использовании разработанного безразмерного комплекса параметров  $Ma$ , предназначена определять концентрацию  $\text{NO}_x$  в ОГ, учитывая конструктивные и регулировочные параметры тепловых энергетических установок и двигателей, скоростные режимы работы и изменение физико-химических свойств ТВС за счёт использования газообразного водорода в качестве химического активатора горения.. Предложенные, в качестве основных параметров  $\tau_{c2}$  и  $V_{c2}$  дают возможность определять концентрацию оксидов азота при проведении теплового расчёта при использовании индикаторной диаграммы давления.

5 Предложенная модель позволила разработать методику расчёта концентрации оксидов, предназначенную для использования в процессе проектирования и доводки тепловых поршневых энергетических установок с искровым зажиганием.

Использование разработанных модели и методики позволит значительно сократить затраты и финансов, и времени при проектировании новых и доводке существующих тепловых поршневых энергетических установок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alik I.A. Automobile Fuel Cars driving: Technologi and the Marketplace / I.A. Alik, U.U. Senney, T.E. Bull - SAE Tech. Pap.830983 – 1983
2. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. Изд.: Ч.1: Пер. с англ./ Под ред. Калверта С., Инглунда Г.М. – Металлургия, 1988
3. Шатров Е.В. топлива для двигателей / Автомобильная промышленность - М.:1982, №2.
4. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменский Д.А., Окисление азота при горении - АН СССР, 1947.
5. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р., Горение, физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. - М., ФМЗМАТЛИТ
6. Образование загрязняющих веществ в пламени. Пер. с англ./ Ред. Н.А. Чигир. - М.: Машиностроение, 1981.
7. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л.: Недра, 1988
8. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие. – централгос. ун-т. Владимир, 2004.
9. Варшавский И.Л., Мищенко А.И., Талда А.И. Снижение токсичности ОГ бензинового двигателя применением добавок водорода. // Тезисы докладов на ВНИПК "Защита Воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами ТС" - Харьков, 1977.
10. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и продуктам их сгорания. - М.: Госэнергоиздат, 1962.
11. Звонов В.А., Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Машиностроение, 1981.

12. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. - М.: МАДИ(ТУ), 2000.
13. Основы горения углеводородных топлив. / Пер. с англ. Под ред. Л.Н. Хитрина и В.А. Попова. - М.: ИЛ, 1960.
14. Воинов А.Н. Сгорание в разных поршневых двигателях. - М.: Машиностроение, 1972.
15. Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др. ДВС: Теория поршневых и комбинированных двигателей. - М.: Машиностроение, 1983.
16. Генкин К.И. Рабочий процесс и сгорания в двигателе с искровым зажиганием. - М.: Машиностроение, 1949.
17. Двигатели моторы. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей. / А.С. Орлин, Д.Н. Вырубов, В.И. Ивин и др. - М.: Машиностроение, 1983, изд. 4.
18. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. - АН СССР, 1963.
19. Соколик А.С. Основы теории процесса нормального сгорания в двигателях с искровым зажиганием. - М.: АН СССР, 1951.
20. Лавров Н.В. Физико-химические основы горения топлива. - М.: Наука, 1971.
21. Петриченко Р.М., Оносовский В.В. Рабочие процессы поршневых машин. М., Машиностроение, 1972.
22. Иноземцев Н.В., Кошкин В.К., Процесс сгорания в двигателях, Под Общ. ред. Н.В. Иноземцева, М., изд-во 1-я тип. Машгиза в Лгр., 1949
23. Лернер М.О., Регулирование процесса горения в двигателях с искровым зажиганием. - М., Наука, 1972.
24. Семенов Е.С., Соколик А.С. Исследование турбулентности в цилиндре

- поршневого двигателя. / Известия АН СССР, 1958.
25. Головина Е.С., Федоров П.Г. Влияние физико-химических факторов на скорость распространения пламени // В кн.: Исследование процессов горения - М.: АН СССР, 1958, с. 44 – 55
26. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива: Справ. Пособие. - Л.: 1987.
27. Жегалин О.И., Лукачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. - М.: Транспорт, 1985.
28. Одноцилиндровая установка университета УИТ-85 для определения октановых чисел топлив./ инструкция описание и инструкция по эксплуатации.
29. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями // Под ред. Д. Хиллиарда, Дж. Спрингера; пер. с англ.- М.: Машиностроение, 1988 – 504с.
30. Timothy V. Johnson Gasoline Vehicle Emissions - SAE 1999 In Review SAE Tech Pap 2000-01-0855.
31. Lavoie G., Blumberg P. A fundamental model for predicting fuel consumption NOx and HC emission of the conventional S.I. engine. - Comb. Sci. and Tech., Vol. 21, 1980
32. R. Sierens. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions // University of Gent laboratory of transporttechnology Sint-Pietersnieuwstraat B-9000 Gent, Belgium., 1999. – 6 p.
33. Lee, S.A. Potentiality of Dedicated EGR in SI Engines Fueled by Natural Gas for Improving Thermal Efficiency and Reducing NOx Emission / Lee, S., Ozaki, K., Iida, N., and Sako, T. // SAE Int. J. Engines 8(1):238-249, 2014.
34. H.A. Dwyer. Analysis and Prediction of in-Cylinder NOx Emissions for Lean Burn CNG/H2 / H.A. Dwyer, Z.McCaffrey, M. Miller / Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, SAE Paper #04SFL-35, 2004.

35. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы // М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2008. - 720 с.
36. . Calcote, H. F. Studies of ionization in flames by means of langmuir probes / H. F. Calcote, I. King // Technical report. – 1955.
37. Mustafi N.N., Miraglia Y.C., Raine R.R., Bansal P.K., Elder S.T., Spark-ignition engine perfomans with «Powergas» fuel (mixture of CO/H<sub>2</sub>): A comparison with gasoline and natural gas. Full 85, 2006, 1605-1612
38. Spicher U.. Optical Fibre Technique as a Tool to Improve Combustion Efficiency SAE paper, 902138, 1990.
39. Мищенко А.И.. Применение водорода для автомобильных двигателей. - Киев, Наукова думка, 1984.
40. Коломиец, П. В. Влияние скорости распространения пламени на выделения оксидов азота при добавке водорода в бензиновые двигатели : автореф. дисс. ... канд. тех. наук : 05.04.02 / Коломиец Павел Валерьевич. – Тольятти, 2007. – 19 с.