

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

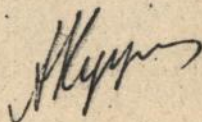
На правах рукописи

Куценко Александр Сергеевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ  
РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДВС НА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВАХ

05.14.05. – теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Харьков 1995

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Институте проблем машиностроения  
НАН Украины.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Симбирский  
Дмитрий Федорович;

доктор технических наук,  
профессор Звонов  
Василий Алексеевич;

доктор технических наук,  
профессор Зацеркляный  
Николай Мелентьевич.

Ведущее предприятие - Харьковское конструкторское  
бюро по двигателестроению Министерства машиностроения,  
ВПК и конверсии.

Защита состоится "06" 06 1996 г. в 14 час.  
на заседании специализированного совета Д 02.18.03 при  
Институте проблем машиностроения НАН Украины (310046, Харьков,  
ул. Дм. Пожарского, 2/10).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
проблем машиностроения НАН Украины.

Автореферат разослан "26" 04 1996 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

*Г. В. Дедков* Дедков Г. В.

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00754411 (M)

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## Общая характеристика работы

### Актуальность проблемы.

Анализ мировых тенденций решения энергоэкологической проблемы автомобильного транспорта применительно к условиям Украины показывает, что наиболее радикальным путем снижения импорта жидких топлив нефтяного происхождения и улучшения экологической обстановки в крупных населенных пунктах является перевод автомобильного транспорта на альтернативные топлива в рамках потенциально располагаемых энергосырьевых ресурсов. Исходя из сырьевой базы и структуры аграрно-промышленного комплекса, сложившейся в Украине, наиболее перспективными из альтернативных топлив следует считать водород и водородсодержащие газы - коксовый и синтезгаз, являющиеся отходами металлургических и химических производств, генераторные газы - продукты газификации угля, а также спирты - метанол и этанол.

Эффективность использования альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) в значительной мере зависит от организации рабочего процесса, включающей выбор состава топливовоздушной смеси, способа регулирования мощности, угла опережения зажигания и других факторов, влияющих на технико-экономические показатели двигателя.

Существующие методы расчетно-теоретических исследований рабочих процессов ДВС в силу их исключительной сложности, в значительной степени опираются на эмпирические зависимости, полученные в результате экспериментов на двигателях различной размерности и быстроходности, работающих на традиционных топливах, производимых из нефти, и природном газе. Используемые на практике математические модели рабочих процессов ДВС на традиционных топливах не адаптированы к широкому спектру составов альтернативных топливовоздушных смесей и не используют в полной мере поте-

нциальные возможности современных ЭВМ, а также методы вычислительной математики, позволяющие учесть такие факторы как диссоциацию продуктов сгорания, кинетику образования токсических компонентов, неоднородность поля температур в цилиндре двигателя, геометрию камеры сгорания. Существенным пробелом в теории рабочего процесса ДВС является глубокий разрыв между математическими моделями синтеза индикаторной диаграммы и обработки экспериментальных индикаторных диаграмм с целью идентификации неопределенных параметров, характеризующих процессы сгорания и теплопередачи. Особое значение преодоления этого разрыва приобретает при исследовании рабочих процессов ДВС на альтернативных топливах в связи с отсутствием достаточного объема достоверных экспериментальных данных.

В связи с этим назрела необходимость в разработке современной методологии моделирования рабочих процессов ДВС и идентификации неизвестных параметров модели по экспериментальным данным, ориентированной на широкий спектр топливоздушных композиций, максимально использующей возможности современных ЭВМ и не выходящей далеко за рамки принятой на практике системы параметров, описывающих исходные данные и выходные показатели рабочих процессов ДВС.

С учетом этого в представленной к защите диссертации разработаны математические модели рабочих процессов ДВС и идентификации параметров модели по экспериментальным данным, ориентированные на широкий спектр альтернативных, энергоносителей, приведены примеры применения разработанных методов к реальным задачам конвертирования автомобильных ДВС на водород и метанол, что позволяет квалифицировать диссертационную работу как актуальную, направленную на решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное прикладное значение.

### Цель и обоснование задачи исследования.

Заключается в создании универсальных математических моделей рабочих процессов поршневых ДВС с внешним смесеобразованием и искровым зажиганием, использующих произвольные альтернативные топлива, а также в разработке методов идентификации законов выгорания топливовоздушных смесей и теплопередачи на основе экспериментальных исследований. Проведение на базе разработанных математических моделей расчетно-теоретических оценок технико-экономических и экологических характеристик различных типов энергоустановок автомобильной техники и создание экспериментальных образцов.

Обоснование теоретической и практической ценности исследования и его научная новизна.

Теоретическая ценность диссертационной работы определяется новыми методиками расчетно-экспериментального исследования рабочих процессов ДВС на альтернативных топливах, позволяющими учесть такие факторы как диссоциация продуктов сгорания, кинетика образования оксида азота, температурный градиент в надпоршневом пространстве, форма поверхности камеры сгорания. Предложены концепции дуальности алгоритмов моделирования и идентификации рабочего процесса, а также его представление в виде энергетической диаграммы.

Практическую ценность определяет комплекс универсальных программ моделирования и идентификации рабочего процесса, совмещенный с базой данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ, позволяющий прогнозировать технико-экономические и экологические показатели ДВС на альтернативных топливах. Комплекс использован в качестве элемента системы автоматизированного проектирования ДВС, а также при экспериментальном конструировании автомобильной техники на альтернативные топлива.

Научную новизну составляют:

1. Концепция представления рабочего процесса поршневого ДВС в виде энергетической диаграммы, наглядно отображающей все процессы превращения энергии, теплопередачи и работы в течении цикла.

2. Комплекс универсальных вычислительных модулей, позволяющих автоматизировать решение широкого круга прикладных задач, возникающих при математическом моделировании и идентификации параметров рабочих процессов поршневых ДВС, использующих произвольные топливоокислительные композиции.

3. Математическая модель рабочего процесса ДВС с искровым зажиганием, основанная на объемном законе выгорания заряда, получаемом в результате гипотезы сферического распространения фронта пламени в камере сгорания заданной конфигурации. Модель предусматривает определение равновесных составов и температур в каждом последовательно выгорающем сферическом слое, а также концентраций оксида азота на основе кинетического механизма.

4. Концепция дуальности методов моделирования и идентификации рабочего процесса, определяющая степень соответствия метода обработки индикаторной диаграммы и применимости результатов идентификации при синтезе индикаторной диаграммы. Предложен алгоритм идентификации закона выгорания топливовоздушной смеси, основанный на двухзонной модели с учетом диссоциации компонентов продуктов сгорания, а также методика оценки коэффициентов теплоотдачи при сжатии, расширении и сгорании.

5. Математическая модель динамических процессов в системе "двигатель-металлогидридный аккумулятор водорода" с жидкостным теплоносителем, позволяющая выбирать конструктивные параметры пусковых металлогидридных элементов, обеспечивающие гарантированный запуск и выход на установившийся режим металлогидридной

бортовой системы хранения водорода.

Б. Математическая модель динамических процессов в системе "двигатель-реактор конверсии метанола", позволяющая прогнозировать поведение ДВС на метаноле в нестационарных условиях, имеющих место при эксплуатации автомобильного транспорта.

#### Уровень реализации, внедрения научных разработок.

Работы, представленные в диссертации, выполнялись в соответствии с планом фундаментальных и прикладных научных исследований НАН Украины, а также в соответствии со Всесоюзной программой по решению научно-технической проблемы 0.85.03 "Создать и внедрить в народное хозяйство эффективные методы и аппараты защиты воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами" (постановление ГКНТ № 440 от 3.11.1975 г. и № 515/27 от 29.12.1981 г.). Часть работ выполнялась в соответствии с Национальной программой по критическим технологиям.

Результаты научных исследований переданы: ГСКБ по автопогрузчикам (г. Львов), Поволжскому отделению Инженерной академии (г. Самара), ХКБД (г. Харьков), ПО "Алтайэнерго" (г. Барнаул), а также используются в учебном процессе для студентов, обучающихся в Харьковском автомобильно-дорожном университете по специальности "Двигатели внутреннего сгорания".

#### Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на научных конференциях: "Защита воздушного бассейна от загрязнений токсичными выбросами транспортных средств" (Харьков, ИПМаш АН Украины - 1977, 1981 г.г.), IV Всесоюзной конференции по новой технике (Харьков, ХАИ - 1977 г.), II Всесоюзной конференции по новой технике (Москва, МАИ 1980 г.), всесоюзных конференциях: "Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания" (Москва, МАИ - 1982, 1986 г.г.), "Современный уровень и пути

совершенствования экономических и токсических показателей двигателей внутреннего сгорания" (Луганск, ЛМСИ - 1983 г.), "Высокий наддув поршневых двигателей и роторные двигатели" (Тбилиси, ИММаш АН Грузии - 1981 г.), на семинаре "Рабочие процессы в ДВС с ограниченным отводом тепла" (Новосибирск, СО АН СССР - 1990 г.), на межотраслевом семинаре "Атомно-водородная энергетика и технология" (Москва, ИЯЭ - 1991 г.), на Всесоюзной научной конференции "Проблемы совершенствования рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания" (Москва, МАДИ 1986 г.), на объединенной конференции "Снижение выбросов оксида азота при сжигании жидких и газообразных топлив в энергетике и на транспорте" (Москва, ЦИАМ - 1989 г.), на конференции "Решение экологических проблем при создании и эксплуатации автомобильной и тракторной техники" (Челябинск, ЧПИ - 1990 г.), на III межреспубликанской конференции "Водородное материаловедение и химия гидридов металлов" (Кацивели - 1993 г.).

#### Публикации и личный вклад автора.

По материалам диссертации опубликовано 37 научных работ, в том числе 1 монография (без соавторов в 1988 г.), 16 статей в периодических изданиях и тематических сборниках (из них 3 зарубежом) и 7 авторских свидетельств и патентов.

Личный вклад автора в работы, написанные в соавторстве, заключается в следующем:

Работы 4,6,7,8,13,14,17. Постановка задач моделирования, разработка основных алгоритмов для ЭВМ.

Работы 9,10,11,12, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24. Проведение расчетно-теоретических оценок конструктивных параметров и технико-экономических характеристик энергоустановок транспортных средств на альтернативных топливах.

Работа 16. Обоснование применения водородсодержащих топлив

для автомобильных ДВС с целью улучшения их экономических характеристик.

Работы 2.3. Вывод основных соотношений для КПД энергопреобразующих систем, состоящих из последовательно соединенных элементов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованных литературных источников и 2 приложений. Работа содержит 241 стр. основного текста, 80 рисунков и 8 таблиц.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе обоснованы предпосылки использования водородсодержащих газовых смесей в качестве топлива для автомобильного транспорта. Основным достоинством водородсодержащих газообразных топлив являются более широкие по сравнению с бензином концентрационные пределы воспламенения, что положительно влияет на топливную экономичность двигателя и токсичность отработавших газов благодаря глубокому обеднению топливовоздушной смеси на частичных режимах. Немаловажным достоинством газообразных топлив следует считать их более высокую детонационную стойкость по сравнению с бензином, что позволяет повысить степень сжатия, а следовательно индикаторный и эффективный КПД двигателя.

Анализ теоретического цикла поршневого ДВС со сгоранием топливовоздушного заряда при постоянном объеме, отличающегося от цикла Отто различными рабочими телами на участках сжатия и расширения дает следующее выражение для термического КПД  $\eta_1$ :

$$\eta = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}-1} \eta_2 - \frac{1}{\bar{\lambda}-1} \eta_1 ; \quad \bar{\lambda} = \frac{\gamma_1-1}{\gamma_2-1} \lambda ; \quad (1)$$

где  $\eta_1$  и  $\eta_2$  - термические КПД циклов Отто с постоянными рабочими веществами, имеющими показатели адиабаты  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , на участках

сжатия и расширения соответственно,  $\lambda$  - степень повышения давления при сгорании.

Анализ соотношения (1) показывает, что определяющим фактором в выражении для КПД является величина  $\eta_2$  - т.е. КПД цикла Отто, на основе продуктов сгорания. Последний, при фиксированной степени сжатия является функцией показателя адиабаты, который в свою очередь зависит от мольной доли трехатомных газов в продуктах сгорания

$$\gamma_2 = \frac{2\beta + 1}{2\beta + 1 + (4.76\alpha - 1)(2\beta + 0.5)}, \quad (2)$$

где  $\beta$  - отношение количеств атомов углерода и водорода в условной формуле топлива,  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха.

Характеристики изменения термического КПД теоретического цикла в зависимости от состава топлива и коэффициента избытка воздуха приведены на рис. 1. Из них следует, что основной эффект от обеднения топливовоздушной смеси имеет место до  $\alpha=2.5$ . Увеличение доли углерода в топливе также способствует повышению КПД теоретического цикла.

Анализ различных способов организации смесеобразования в двигателях на газообразных и бинарных газожидкостных топливах позволяет сделать вывод о необходимости использования комбинированного смесеобразования, сочетающего в себе достоинства внешнего и внутреннего смесеобразования при взаимной частичной компенсации их недостатков. Получено выражение для теоретически возможной химической энергии заряда при комбинированном смесеобразовании.

$$Q_v = \begin{cases} h \frac{P_o}{T_o} \frac{1}{R_B L_o \alpha + R_T} & \text{при } \alpha_o \leq \alpha \leq \alpha_{\max}, \\ h \frac{P_o}{T_o} \frac{\alpha_o}{\alpha} \frac{1}{R_B L_o \alpha_o + R_T} & \text{при } 1 \leq \alpha < \alpha_o, \end{cases} \quad (3)$$

где  $h$  - химическая энергия единицы массы газообразного топлива;

$\alpha_0$  - коэффициент избытка воздуха во внешне подготовленной смеси;  $R_B, R_T$  - газовые постоянные воздуха и топлива;  $P_0, T_0$  - давление и температура топливовоздушной смеси на впуске;  $L_0$  - стехиометрическое отношение.

Газификация жидких топлив и, прежде всего, конверсия метанола, позволяют реализовать концепцию термохимической регенерации энергии отработавших газов путем превращения ее части в дополнительную химическую энергию продуктов конверсии жидкого топлива. Получен наиболее общий вид выражения для КПД энергоустановки с регенерацией энергии отработавших газов.

$$\eta = \eta_0 \frac{1 - \sigma}{1 - \lambda (1 - \eta_0) - \sigma \eta_0}, \quad (4)$$

где  $\eta_0$  - КПД базовой энергоустановки без учета регенерации,  $\lambda$  - доля химической энергии отработавших газов, возвращаемой в рабочий цикл,  $\sigma$  - доля механической энергии, затраченной на осуществление процесса регенерации.

В качестве переходного варианта рассматриваются газожидкостные топливные системы, позволяющие сочетать достоинства жидких и газообразных топлив. Исследования в этом направлении проводились и ранее в ИПМаш НАН Украины и в Институте газа НАН Украины. Их суть заключалась в комбинированной подаче жидкого и газообразного топлив, а также их смесей для достижения требуемых характеристик по обеднению или по детонационной стойкости топливовоздушных смесей. При этом одним из ограничительных факторов являлось требование некоторого минимального бортового запаса газообразного топлива, требующего для своего хранения баллонов высокого давления. В современных условиях целесообразно сформулировать и другую задачу, направленную на минимизацию расхода жидкого топлива за счет замены его части газообразным. В соответствии с такой постановкой получено соотношение, связывающее относитель-

ную дальность пробега между заправками  $\chi$  с экономией жидкого топлива автомобиля  $\xi$

$$\chi = \begin{cases} \frac{1}{1-\xi} & \text{при } 0 \leq \xi < \frac{\xi_1}{1+\xi_1} \\ \frac{\xi}{1+\xi} & \text{при } \frac{\xi_1}{1+\xi_1} < \xi \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

где  $\xi$  - отношение пробега при использовании только газообразного топлива к пробегу на жидком топливе.

Экономия бензина в соответствии с (5) при максимально возможном пробеге  $\xi^*$ , при сохранении "бензинового" пробега  $\xi_1$  и его половины  $\xi_{0.5}$  для автомобиля ЗИЛ-130 с 8-баллонной системой хранения газа в зависимости от вида газовой компоненты приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Газовая компонента	$\xi^*$	$\xi_1$	$\xi_{0.5}$
Метан	0.31	0.45	0.90
Водород	0.12	0.14	0.28
Синтез-газ	0.13	0.15	0.30
Коксовый газ	0.19	0.24	0.48
Доменный газ	0.05	0.05	0.10
Генераторный газ	0.06	0.07	0.14

Таким образом в первой главе обоснована перспективность и актуальность применения альтернативных водородсодержащих топлив для ДВС.

Во второй главе обоснован выбор методологии математического моделирования рабочих процессов ДВС на альтернативных топливах. Многообразие альтернативных топлив с различными термодинамическими характеристиками топливовоздушного заряда и продуктов сгорания, высокие температуры, достигаемые при сгорании водородсодержащих газов, вызывающие диссоциацию отдельных компонентов продуктов сгорания, отсутствие данных по характеристикам тепло-

выделения, требуют новых подходов к математическому моделированию рабочих процессов ДВС.

Существуют три основных подхода к разработке математической модели сложных физико-технических систем, к разряду которых относится поршневой двигатель внутреннего сгорания.

Первым подходом, полностью игнорирующим структуру процесса, является метод "черного ящика", основанный на установлении экспериментальных зависимостей между конструктивными и управляющими, с одной стороны, и параметрами, характеризующими качественные показатели рабочего процесса, с другой стороны. Для построения таких моделей, как правило, применяется хорошо разработанный аппарат планирования эксперимента.

В противовес модели "черного ящика" модель абсолютно "прозрачного ящика" представляет собой бесконечномерное представление рабочего процесса в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих неравновесную термодинамическую газовую смесь с переменным химическим составом. Эту систему необходимо дополнить системой уравнений, описывающих теплопроводность элементов конструкции, гидродинамику и теплообмен охлаждающей жидкости в системе охлаждения, а также системой уравнений газодинамики впускной и выпускной систем. Указанные подсистемы дифференциальных уравнений в принципе существуют, однако их численное решение в полном объеме не представляется возможным.

Реальной основой для математического моделирования рабочего процесса является блочная модель, состоящая из ряда относительно независимых подсистем, связанных между собой в пространстве и во времени конечным числом конструктивных и управляющих параметров. Наиболее узким местом при реализации блочных моделей является процесс сгорания топливовоздушной смеси. Обычно в качестве моделей принимаются различные эмпирические и полуэмпирические

кие зависимости, связывающие количество выгоревшего заряда с углом поворота коленчатого вала. Такие соотношения известны для определенных классов двигателей, использующих традиционные топлива, однако для альтернативных такие соотношения в большинстве случаев отсутствуют. Более физически обоснованной представляется модель процесса сгорания, основанная на гипотезе сферического распространения фронта пламени. Такой подход позволяет учесть как геометрию камеры сгорания, а для получения закона выгорания заряда требуется только информация о турбулентной скорости сгорания.

Анализ различных подходов к проблеме моделирования отдельных фрагментов рабочего процесса численными методами на ЭВМ с точки зрения их реальности, универсальности и адекватности реальному процессу предопределил выбор следующих основных типов парциальных моделей:

- двухзонная или многозонная модель процесса сгорания, основанная на объемном законе выгорания заряда по сферической модели распространения пламени;
- равновесный состав продуктов сгорания и кинетический механизм образования оксида азота по каждой из рассматриваемых зон;
- теплопередача от различных зон рабочего вещества к элементам конструкции описываемая интегральным соотношением, основанным на законе Ньютона-Рихмана, структура коэффициента теплоотдачи соответствует структуре, предложенной Бриллингом, Пфалумом, Эйхельбергом, Вошни, в виде степенной зависимости от температуры и давления рабочего вещества в цилиндре;
- термодинамические свойства индивидуальных веществ, составляющих рабочее тело, на различных этапах рабочего процесса содержатся в базе данных, обращение к которой позволяет выбрать любые топливоокислительные композиции.

- скорость истечения и массовый расход вещества через газораспределительные органы, а также перетекание между элементами энергоустановки, определяются на основании второго начала термодинамики, аналитическое выражение которого позволяет связать между собой начальное и конечное состояние вещества через его энтропию.

Основной задачей математического моделирования рабочего процесса ДВС можно считать задачу синтеза его индикаторной диаграммы, которая является исчерпывающей характеристикой, содержащей основную информацию о процессе преобразования энергии в двигателе. Таким образом, задачу математического моделирования можно символически представить в виде отображения  $\Omega$

$$(\Gamma, G, U, X, Q) \xrightarrow{\Omega} P \quad (6)$$

где  $\Gamma$  - множество конструктивных факторов,  $G$  - множество величин, определяющих термодинамические свойства веществ,  $U$  - множество режимных и управляющих факторов,  $X$  - параметры, определяющие закон выгорания топливовоздушного заряда,  $Q$  - множество величин, определяющих закон теплоотдачи от рабочего тела к элементам конструкции,  $P$  - множество ординат индикаторной диаграммы.

Численные значения элементов множеств  $X$  и  $Q$ , как правило, определяются экспериментальными методами путем индицирования двигателя и решения задачи идентификации, обратной в некотором смысле задаче моделирования и символически представимой в виде отображения  $\Omega^{-1}$

$$(\Gamma, G, U, P) \xrightarrow{\Omega^{-1}} (X, Q) \quad (7)$$

Взаимосвязь задач моделирования и идентификации представлена на рис. 2.

Алгоритмы, реализующие отображения  $\Omega$  и  $\Omega^{-1}$  должны обладать свойством дуальности, т.е. подстановка результата  $P$  отобра-

жения (6) в отображение (7) дает результат  $\hat{X}$  и  $\hat{Q}$ , совпадающий с заданной степенью точности с соответствующими значениями  $X$  и  $Q$ , входящими в отображение (6). И наоборот: подстановка результата  $(X, Q)$  отображения (7) в отображение (6) дает результат - индикаторную диаграмму  $\hat{P}$ , близкую с заданной степенью точности к исходной диаграмме  $P$ , входящей в (7).

Принцип дуальности алгоритмов анализа и синтеза рабочих процессов предполагает разработку специальных математических моделей фрагментов рабочего процесса и соответствующих программных средств их численной реализации, изложению которых посвящен третий и четвертый разделы диссертационной работы.

В третьей главе рассмотрены некоторые основные подходы к разработке универсальных математических моделей анализа и синтеза рабочих процессов поршневых ДВС.

Среди фрагментов математических моделей рабочих процессов ДВС на альтернативных топливах особенно следует остановиться на моделях преобразования смесей индивидуальных веществ и вычисления их термодинамических характеристик. В связи с этим сформулированы основные элементы алгебры смесей, состоящей из множества объектов алгебры - векторов смесей индивидуальных веществ и операций смешения и фильтрации. Выведены дифференциальные уравнения, описывающие изменение состава смеси в контрольном объеме при произвольном количестве источников вещества, связанных с контрольным объемом путем массообмена

$$m \frac{dq_i}{dt} = \sum_{k=1}^s (g_i^k - g_i) G_k, \quad (8)$$

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{k=1}^s G_k - G,$$

где  $m$  - масса вещества в контрольном объеме,  $q_i$  - доля  $i$ -го вещества в контрольном объеме,  $g_i^k$  - доля  $i$ -го вещества в  $k$ -том

источнике,  $G_k$  - интенсивность расхода вещества из  $k$ -го источника,  $G$  - интенсивность расхода вещества из контрольного объема.

При изменении состава газовой смеси, вызванном происходящими в ней химическими реакциями, на концентрации индивидуальных веществ наложены ограничения, определяемые начальным балансом элементов, входящих в индивидуальные вещества смеси. Наиболее общим видом таких ограничений следует, по-видимому, считать их матрично-векторную форму.

$$\Lambda/v = Lc, \quad (9)$$

где  $c$  - вектор молярных концентраций индивидуальных веществ реагирующей смеси,  $L$  - молекулярная матрица,  $(i, j)$  элемент которой соответствует количеству атомов  $j$ -го элемента в  $i$ -том индивидуальном веществе,  $v$  - удельный объем смеси,  $\Lambda$  - вектор, компоненты которого являются количеством молей каждого из элементов, приходящихся на единицу массы смеси.

Вектор-инвариант реагирующей смеси  $\Lambda$  связан с условной формулой топливозвоздушной смеси соотношением

$$\Lambda = \left( \frac{Y_1}{M}, \frac{Y_2}{M}, \dots, \frac{Y_m}{M} \right),$$

где  $Y_i$  - коэффициент при  $i$ -том элементе в условной формуле топливозвоздушной смеси,  $M$  - кажущаяся молярная масса смеси.

В свою очередь, коэффициенты условной формулы определяются исходя из объемных долей компонентов газовой смеси  $\gamma_j$  в виде

$$Y_i = \sum_{j=1}^S l_{ij} \gamma_j$$

Для топливозвоздушной смеси, состоящей из топлива с условной формулой  $C_n H_m O_r N_1$  и воздуха с условной формулой  $O_{0.42} N_{1.58}$ , коэффициенты условной формулы имеют вид:

$$Y_1 = \frac{n}{\alpha L_0 + 1}; \quad Y_2 = \frac{m}{\alpha L_0 + 1}; \quad Y_3 = \frac{r + 0.42\alpha L_0}{\alpha L_0 + 1}; \quad Y_4 = \frac{1 + 0.58\alpha L_0}{\alpha L_0 + 1}$$

Предполагая состав продуктов реакции равновесным, систему уравнений материального баланса (9) необходимо дополнить систе-

мой уравнений действующих масс, имеющей вид

$$Ax = k(T) \quad (10)$$

где  $A$  - стехиометрическая матрица коэффициентов реакций;  $x$  - вектор составленный из логарифмов концентраций;  $k(T)$  - вектор, составленный из логарифмов констант равновесия.

Итерационная схема решения системы уравнений (9), (10) методом Ньютона представима в векторно-матричной форме

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k + \Delta^k, & \Delta^k &= -B^{-1}(x^k) F(x^k), \\ B(x^k) &= \left( -\text{diag}_{\frac{c_k}{A}} \right), & F(x^k) &= \left[ -L_{\frac{c_k}{k}} = \Delta Y \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где индексы  $k$  и  $k+1$  соответствуют номерам последовательных приближений.

Представление системы уравнений равновесия в форме (9), (10) и схемы ее решения согласно (11) позволяет в значительной степени автоматизировать процесс определения равновесных концентраций компонентов продуктов сгорания произвольной топливовоздушной смеси.

Определение температуры продуктов сгорания при наличии процессов диссоциации и рекомбинации отдельных компонентов удобно производить, пользуясь методом полных внутренних энергий. Последний основан на выборе начальных значений внутренней энергии индивидуальных веществ, равной их теплоте образования из стандартных  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $C$  и др. при стандартной температуре ( $T_0 = 298.15^\circ K$ ).

В свою очередь, изменение полной внутренней энергии в замкнутой системе определяется только лишь взаимодействием рабочего вещества с окружающей средой путем механической работы и теплопередачи и не зависит от химических процессов, происходящих в ДВС. Это позволяет проиллюстрировать рабочий процесс энергетической диаграммой, которая сочетает в себе основную информацию о перераспределении различных видов энергии в цилиндре и о взаимо-

действии с окружающей средой. Энергетическая диаграмма приведена на рис. 3. Изменение полной внутренней энергии рабочего вещества соответствует расстоянию между кривыми 1 и 2, представляющими собой изменение механической работы, производимой окружающей средой и теплотой, подведенной путем теплопередачи между рабочим веществом и конструкцией. Отсчет интегральных величин работы и теплоты производится относительно координатных осей  $oa$  и  $oa_1$  соответственно, расположенных на расстоянии, равном разности полных внутренних энергий заряда и продуктов сгорания при стандартной температуре. Заштрихованная область представляет собой термическую часть полной энергии (индекс Т), а незаштрихованная химическую (индекс х). Углы поворота коленчатого вала  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  соответствуют началу и концу сгорания, а кривые  $cd$  и  $cd$  делят области химической и термической энергии на составляющие, соответствующие зонам заряда (индекс 1) и продуктов сгорания (индекс 2). Отличие от нуля химической энергии зоны продуктов сгорания  $U_{xz}$  связано с наличием продиссоциированных компонентов. В процессе расширения при охлаждении рабочего вещества эта величина стремится к нулю. В точке  $\pi$  диаграммы получаем интегральный баланс цикла в виде механической работы  $L_f$ , количества теплоты, отведенной в стенки  $Q_f$  и энергии продуктов сгорания  $U_f$ .

При моделировании рабочего процесса на альтернативных топливах основной сложностью является отсутствие информации о законах выгорания заряда в цилиндре двигателя, обусловленных как физико-химическими свойствами топливовоздушной смеси, так и формой камеры сгорания. Для учета второго фактора введено понятие сферических функций камеры сгорания  $S_\rho(\rho, h)$  и  $F_\rho(\rho, h)$ , представляющих собой зависимости величины сферической поверхности, заключенной внутри камеры, и величины поверхности камеры сгорания, заключенной внутри сферы радиуса  $\rho$  с центром в точке воспламене-

ния, от радиуса  $\rho$  и перемещения поршня относительно верхней мертвой точки  $h$ .

Предложена методика построения сферических функций, основанная на упорядоченной параметризации поверхностей, ограничивающих камеру сгорания. Использование сферических функций позволяет приближенно синтезировать закон выгорания, исходя из турбулентной скорости фронта пламени.

В четвертой главе описана система универсальных базовых вычислительных модулей, позволяющая решать достаточно широкий круг задач, возникающих при моделировании и идентификации рабочих процессов ДВС, работающих на произвольных топливо-окислительных композициях. Предлагаемая система модулей, структурная схема которой показана на рис. 4, позволяет автоматизировать решение следующих локальных задач, наиболее часто встречающихся при моделировании рабочих процессов:

- вычисление теплофизических характеристик смеси идеальных газов заданного состава и температуры (MIX);
- определение температуры смеси заданного состава по известным внутренней энергии, энтальпии или энтропии (TEM);
- вычисление адиабатической скорости истечения, массового или объемного расходов идеального газа через проходное сечение заданной площади (IST);
- определение константы равновесия произвольной химической реакции при заданной температуре (CONST);
- определение равновесного состава смеси газов по заданной схеме реакции (DIS).

Перечисленные основные модули действуют в среде массивов, несущих информацию о теплофизических свойствах индивидуальных веществ. Эти массивы формируются с помощью служебных модулей ID, DD и MET, которые связывают базу данных с основной программой.

База данных представляет собой двумерный массив, каждая строка которого соответствует некоторому индивидуальному веществу. Каждому из веществ ставится в соответствие 15 чисел, составляющих коэффициенты полиномов, аппроксимирующих энтальпию и энтропию, газовую постоянную, молекулярную массу и количество элементов O, N, C и H в его химической формуле.

Подпрограмма MIX основана на представлении энтальпии или энтропии индивидуальных веществ в виде полинома 7-й степени от температуры с последующим вычислением линейных комбинаций индивидуальных свойств с заданными весовыми коэффициентами.

Модуль TEM основан на численном решении методом Ньютона уравнения 7-й степени относительно температуры T

$$\varphi(\gamma, T) = \varphi_0,$$

где  $\varphi_0$  - заданное значение энтальпии, внутренней энергии или энтропии. Производная  $\partial\varphi/\partial T$ , необходимая для реализации метода Ньютона, определяется модулем MIX в виде

$$\left( \frac{\partial\varphi}{\partial T} \right) = \begin{cases} c_p(\gamma, T), & \text{если } \varphi_0 - \text{энтальпия;} \\ c_v(\gamma, T), & \text{если } \varphi_0 - \text{внутренняя энергия;} \\ \frac{c_p}{T}, & \text{если } \varphi_0 - \text{энтропия.} \end{cases}$$

Подпрограмма IST основана на определении температуры истекающего газа  $T_b$ , находящегося в начальном состоянии при температуре  $T_a$ . В предположении изоэнтропичности истечения эти величины связаны соотношением

$$S(T_b) = S(T_a) + R \ln \pi,$$

где  $S(T_b)$  и  $S(T_a)$  - температурные составляющие энтропии,  $\pi$  - отношение давлений,  $R$  - газовая постоянная.

Температура  $T_b$  определяется с помощью модуля TEM, а скорость истечения  $W$  - в виде

$$W = \sqrt{2(i_a - i_b)},$$

где  $i_a$  и  $i_b$  - энтальпии исходного и расширившегося газа, для вычисления которых используется модуль MIX.

Константы равновесия вычисляются на основании известного соотношения:

$$\ln k = \frac{T \Delta S - \Delta I}{R_0 T},$$

где  $\Delta S$  и  $\Delta I$  - изменения стандартной энтропии и энтальпии в результате реакции, которые вычисляются обращением к модулю MIX.

Полученные константы равновесия используются в модуле DIS, который решает систему уравнений материального баланса и равновесия (9) и (10) методом Ньютона по схеме (11) с коррекцией шага.

Изложенные в третьей и четвертой главах методики и алгоритмы являются элементарной базой для построения фрагментов математических моделей рабочих процессов ДВС более высокого уровня, которые и рассмотрены в пятой главе.

В пятой главе рассмотрены некоторые численные модели фрагментов рабочего процесса ДВС с внешним смесеобразованием, основанные на системе универсальных модулей, описанной в предыдущем разделе.

Приведен конкретный пример построения сферических функций для камеры сгорания клиновидной формы, схематически представленной на рис. 5.6. Для камер такого типа область надпоршневого пространства представима в виде

$$R = R_1 \cup R_2,$$

где  $R_1$  - наклонная цилиндрическая область постоянной геометрии, а  $R_2$  - цилиндрическая область, зависящая от положения поршня  $H$ . В предикатной форме области  $R_2$  и  $R_1$  представимы в виде

$$R_2 = (x^2 + y^2 < R_0^2) \wedge (z > H_0) \wedge (z < H) \quad (12)$$

$$R_1 = (|x_1| < \frac{A}{2} \wedge (z_1 > 0) \wedge (z_1 < (\kappa_1 + \frac{A}{2}) \operatorname{tg} \alpha + H_1) \wedge$$

$$\left( (|y_1| < \frac{C}{2}) \vee (x_1^2 + (y_1 - \frac{B}{2})^2 < r^2) \vee (x_1^2 + (y_1 + \frac{B}{2})^2 < r^2) \right) \quad (13)$$

Координатные системы  $oxyz$  и  $o_1x_1y_1z_1$  связаны между собой поворотом на угол  $\alpha$  и переносом начала координат на величины  $\xi$  и  $\zeta$ , определяющие положение точки  $O_1$  относительно системы координат  $oxyz$ . Эта взаимосвязь представима в виде

$$\begin{aligned} y_1 &= y, \\ x_1 &= (x - \xi) \cos \alpha - (z - \zeta) \sin \alpha, \\ z_1 &= (x - \xi) \sin \alpha - (z - \zeta) \cos \alpha. \end{aligned}$$

Проверка принадлежности точки сферического фронта  $(\rho, \varphi, \theta)$ , имеющей в системе  $oxyz$  вид

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \rho \sin \varphi \cos \theta, \\ y &= y_0 + \rho \sin \varphi \sin \theta, \\ z &= z_0 + \rho \cos \varphi, \end{aligned}$$

области надпоршневого пространства  $R$ , осуществляется проверкой истинности предикатов (12) для  $xuz$  и (13) для  $x_1y_1z_1$ . Сферическая функция  $S_1$  камеры сгорания двигателя ВАЗ-2106, полученная в результате приведенного алгоритма для двух положений поршня относительно в.м.т. представлена на рис. 7. Аналогичным образом строится сферическая функция  $V_2$ , определяющая поверхность контакта продуктов сгорания со стенкой, а ее вид для указанной камеры сгорания приведен на рис. 8.

Из всех участков рабочего процесса поршневого ДВС наиболее сложным для математического моделирования является участок сгорания. Рассмотрены четыре модели сгорания, основанные на массовом и объемном законах выгорания, а также на гипотезах полного смешивания и абсолютного несмешивания продуктов сгорания. Среди этих моделей следует выделить многозонную модель с объемным законом выгорания. При таком подходе на  $i$ -том шаге процесса сгорания рабочее вещество представляется в виде расслоенной системы

из  $i+1$  зоны. Первые  $i$ -зон состоят из продуктов сгорания, а  $i+1$  зона - из свежего заряда. Для  $k$ -й зоны на  $i$ -том шаге процесса справедлив закон сохранения энергии в разностной форме

$$u(g_{ik}, T_{ik}) - u(g_{i-1,k}, T_{i-1,k}) = -P_{i-1}(v_{ik} - v_{i-1,k}) - q_{i-1,k}, \quad (14)$$

где  $g_{ik}$ ,  $T_{ik}$ ,  $v_{ik}$  - вектор состава, температура и удельный объем  $k$ -той зоны на  $i$ -м шаге,  $P_{i-1}$  - давление на  $i-1$ -м шаге,  $q_{i-1,k}$  - количество тепла, отведенного в стенки от единицы массы  $k$ -й зоны на  $i$ -м шаге.

Кроме уравнения энергетического баланса для каждой из зон можно записать уравнение газового состояния

$$P_i v_{ik} = R(g_{ik}) T_{ik} \quad (15)$$

Система уравнений (14), (15) дополняется уравнением массового баланса

$$\sum_{j=1}^{i-1} m_j + \frac{P_i}{R(g_{i1}) T_{i1}} (V_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{m_j R(g_{j1}) T_{j1}}{P_j}) + \frac{(V_{T1} - V_i) P_i}{R(g_{i1+i}) T_{i1+i}} = m \quad (16)$$

где первое слагаемое представляет собой массу первых  $i-1$  зон, второе - массу последней выгоревшей зоны свежего заряда, третье - массу негоревшей части,  $V_i, V_{T1}$  - объемы продуктов сгорания и надпоршневого пространства на  $i$ -м шаге соответственно.

При использовании в качестве топлива водорода и водородсодержащих газов температура в зоне сгорания превышает 2500 K, что приводит к заметной диссоциации продуктов сгорания. В связи с этим составы продуктов сгорания  $g_{ik}$ , фигурирующие в системе (14)-(16) необходимо определять исходя из соотношений (9), (10) для равновесных составов, записанных для каждой из зон.

Для совместного решения системы (14)-(16) и подсистем вида (9), (10) разработан специальный численный метод, основанный на раздельном решении системы уравнений (14), (16) при некоторых фиксированных составах  $g_{ik}$  и подсистем (9), (10) для каждой из зон при фиксированных  $T_{ik}$  и  $v_{ik}$ . Замыкание двух подсистем осуществлялось методом Ньютона, причем матрица частных производных для

вычисления поправок определяется путем численного дифференцирования. Концентрации оксида азота в каждой из зон определялись на основе интегрирования кинетического уравнения образования NO по механизму Зельдовича. Разработанная методика была апробирована для 50-100 зонных моделей, что эквивалентно решению системы до 1100 алгебраических уравнений, и показала хорошую сходимость.

На рис. 9, 10 показано рассчитанное по описанной методике распределение температур и концентраций оксида азота в камере сгорания ДВС, работающего на смеси бензина и водорода, в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

Полная математическая модель рабочего процесса, реализованная на ЭЭВМ, включает

- систему автоматизированной подготовки исходных данных для произвольных топливноокислительных композиций;
- систему построения сферических функций камеры сгорания;
- подсистемы процессов сжатия, сгорания и расширения, учитывающие диссоциацию компонентов продуктов сгорания и кинетику образования оксида азота;
- подсистему расчета процессов впуска и выпуска.

Все подсистемы используют стандартные модули MET, MIX, TEM, CONST, DIS, IST, DD, ID, а также программные модули более высокого уровня RNS и ZONA для определения термодинамических параметров рабочего вещества в процессе сгорания для двухзонной и многозонной моделей.

В шестой главе предлагается методика идентификации параметров математической модели рабочего процесса на основании его индикаторной диаграммы, дуальная двухзонной модели сгорания с учетом диссоциации.

В состав идентифицируемых параметров включены  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - множитель и показатели степени в выражении, аппроксимирующем

теплоотдачи

$$\alpha_w = \alpha_1 p^{\alpha_2} T^{\alpha_3}, \quad (17)$$

углы поворота коленчатого вала  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , соответствующие началу и концу участка сгорания, средняя температура тепловоспринимающей поверхности  $T_w$ , показатель сгорания Вибе массового закона выгорания топливовоздушной смеси.

Основной сложностью при определении закона выгорания по экспериментальным данным является разделение теплового эффекта реакции сгорания и теплопередачи на участке сгорания, сумма которых определяется путем интегрирования приращений работы цикла и изменения внутренней энергии рабочего вещества в процессе сгорания.

Разработана методика идентификации, позволяющая определить закон выгорания топливовоздушной смеси с учетом диссоциации продуктов сгорания и закон теплоотдачи на участке сгорания. В основу метода положена гипотеза о том, что в процессе сгорания теплоотдача от зон заряда и продуктов сгорания происходит по законам, аналогичным законам теплоотдачи на участках сжатия и расширения соответственно. В свою очередь коэффициенты теплоотдачи на участках сжатия и расширения идентифицируются на основе использования интегральной формы первого начала термодинамики и уравнений химического равновесия для продуктов сгорания.

На участке сжатия кривая теплообмена  $q_w(\varphi)$  определяется из интегральных соотношений

$$\begin{aligned} q_w(\varphi) &= \Delta u \Big|_{-\pi}^{\varphi} - \int_{-\pi}^{\varphi} p(\varphi) dv(\varphi), \\ u(\varphi) &= u(T_1(\varphi), g_1), \\ T_1(\varphi) &= \frac{p(\varphi) v(\varphi)}{R(g_1)}, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $g_1$  - состав заряда,  $T_1$ ,  $p$ ,  $v$ , - температура, давление и удельный объем заряда в процессе сжатия.

Кривая теплообмена на участке сжатия для водородного ДВС

при  $\alpha=1.02$  приведена на рис. 11. Точка максимума  $\varphi_W$  - соответствует нулевому среднему тепловому потоку, а температуру  $T_1(\varphi_W)$  можно принять в качестве средней температуры поверхности теплообмена. В качестве момента начала сгорания принята абсцисса точки перегиба  $\varphi_1$ .

На участке расширения уравнения энергетического баланса и состояния для продуктов сгорания необходимо дополнить системой уравнений для определения равновесного состава вида (9) и (10). Поскольку момент конца сгорания неизвестен, то процесс расширения удобно рассматривать в обратном направлении, начиная со значения угла поворота коленчатого вала  $\lambda$ , соответствующего концу расширения. Тогда система уравнений для определения кривой теплоотдачи на расширении примет вид

$$\begin{aligned} q_W(\varphi) &= \Delta u|_{\lambda}^{\varphi} + \int_{\lambda}^{\varphi} p(\varphi) dv(\varphi), \\ u(\varphi) &= u(T_2(\varphi), g_2), \\ T_2(\varphi) &= \frac{p(\varphi) v(\varphi)}{R(g_2)}, \\ f(g_2, T_2, v(\varphi)) &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

где  $g_2$ ,  $T_2$  - состав и температура продуктов сгорания,  $f$  - символическое обозначение (9), (10) для определения равновесного состава  $g_2$ .

Кривая теплоотдачи, полученная в результате численного решения системы уравнений (19), на расширении для водородного ДВС при  $\alpha=1.02$  приведена на рис. 12. В качестве конца участка сгорания, так же как и на участке сжатия, принята точка  $\varphi_2$ , соответствующая перегибу функции  $q_W(\varphi)$ .

Значения параметров, входящих в выражение (17) для коэффициентов теплоотдачи на сжатии и расширении, определяются путем решения оптимизационной задачи минимизации среднеквадратичного отклонения

$$J(\alpha) = \sum_{k=1}^n (q_{W_k} - \hat{q}_{W_k})^2 \quad (20)$$

экспериментально полученных кривых  $q_w(\varphi)$  на участках сжатия и расширения и кривой теплоотдачи, полученной в результате интегрирования дифференциального уравнения Ньютона-Рихмана,

$$\frac{\hat{d}q_w}{d\varphi} = \alpha_1 P^{\alpha_2}(\varphi) T^{\alpha_3}(\varphi) F(\varphi) (T(\varphi) - T_w) \omega^{-1}, \quad (21)$$

где  $\omega$  - угловая скорость коленчатого вала,  $F(\varphi)$  - текущая поверхность теплообмена.

В качестве метода оптимизации выбран градиентный метод наискорейшего спуска. Направление спуска  $H$  определяется соотношениями

$$H_i = 2 \sum_{k=1}^N (q_{wk} - \hat{q}_{wk}) \frac{\partial \hat{q}_{wk}}{\partial \alpha_i}; \quad i=1,2,3,$$

где частные производные, исходя из разностного представления уравнения (20), вычисляются рекуррентно в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{q}_{w_{k+1}}}{\partial \alpha_1} &= \frac{\partial \hat{q}_{w_k}}{\partial \alpha_1} + P_k^{\alpha_2} T_k^{\alpha_3} F_k (T_k - T_w) \omega^{-1} \Delta\varphi, \\ \frac{\partial \hat{q}_{w_{k+1}}}{\partial \alpha_2} &= \frac{\partial \hat{q}_{w_k}}{\partial \alpha_2} + \alpha_1 P_k^{\alpha_2} (\ln P_k) T_k^{\alpha_3} F_k (T_k - T_w) \omega^{-1} \Delta\varphi, \\ \frac{\partial \hat{q}_{w_{k+1}}}{\partial \alpha_3} &= \frac{\partial \hat{q}_{w_k}}{\partial \alpha_3} + \alpha_1 T_k^{\alpha_3} (\ln T_k) P_k^{\alpha_2} F_k (T_k - T_w) \omega^{-1} \Delta\varphi, \\ \frac{\partial \hat{q}_{w_i}}{\partial \alpha_i} &= 0, \quad i=1,2,3. \end{aligned}$$

Максимальная "длина" итерационного шага  $\lambda$  оценивается исходя из разложения приращения функционала в ряд Тейлора в окрестности предыдущего приближения и составляет

$$\lambda = \frac{j(\alpha)}{(H, H)},$$

где  $j(\alpha)$  - численное значение квадратичного отклонения на предыдущем шаге. Поиск оптимальной величины шага производится методом дихотомии на интервале  $(0, \lambda)$ .

Массовая доля выгоревшего заряда определяется из системы

уравнений для двухзонной модели сгорания, имеющей вид

$$\begin{aligned} (1-x) u(T_1, g_1) + x u(T_2, g_2) &= u, \\ (1-x) R(g_1) T_1 + x R(g_2) T_2 &= pv, \\ S(g_1, T_1) - R(g_1) \ln p &= S, \end{aligned} \quad (22)$$

где индекс 1 относится к зоне заряда, а 2 - к зоне продуктов сгорания,  $x$  - массовая доля продуктов сгорания.

При заданных составах  $g_1$  и  $g_2$ , давлении  $p$ , внутренней энергии  $u$ , энтропии  $S$  и удельном объеме  $v$  система уравнений (22) разрешима относительно  $x$ ,  $T_1$  и  $T_2$ . Температура  $T_1$  определяется из 3-го уравнения системы (22)

$$T_1 = \text{TEM} [S + R(g_1) \ln p],$$

а первые два уравнения после исключения  $x$  сводятся к одному нелинейному уравнению относительно  $T_2$

$$(u(T_1, g_2) - u)R_1 T_1 + (u - u(T_2, g_2))R_2 T_2 - pv(u(T_2, g_2) - u_1) = 0, \quad (24)$$

которое численно решается методом Ньютона.

Для учета диссоциации продуктов сгорания их состав корректировался в соответствии с решением системы уравнений равновесия, при температуре  $T_2$ , полученной из (24). Полученное значение  $g_2$  принималось в качестве исходного при решении системы (22). Эта процедура повторялась до достижения требуемой точности решения.

Значения  $u$  и  $S$ , входящие в (22), определяются в результате интегрирования дифференциальных уравнений для внутренней энергии всей системы и энтропии для несгоревшей зоны заряда

$$\begin{aligned} du &= -p dv - (1-x) dq_{W_1} - x dq_{W_2}, \\ dS &= -\frac{1}{T_1} dq_{W_1}. \end{aligned} \quad (25)$$

Элементы теплоты  $dq_{W_1}$  и  $dq_{W_2}$ , входящие в (25), определяются исходя из коэффициентов теплоотдачи, полученных ранее для зон заряда и продуктов сгорания.

На рис. 13 приведены законы выгорания водородовоздушных зарядов в двигателе ВАЗ-2101, полученные в результате применения описанной методики идентификации.

Сформулированный ранее принцип дуальности алгоритмов моделирования и идентификации рабочего процесса реализован в едином вычислительном комплексе, основанном на двузонной модели процесса сгорания с учетом диссоциации высокотемпературных компонентов. Дуальность алгоритмов обусловлена общностью локальных базовых моделей, используемых в прямой и обратной задачах. Разработанный комплекс с автоматизированной подготовкой исходных данных позволяет осуществлять синтез индикаторной диаграммы или ее анализ по экспериментальным данным, а также проверку адекватности результатов идентификации, используя синтезирующий блок вычислительного комплекса.

В седьмой главе рассмотрены математические модели рабочих процессов энергоустановок, состоящих из ДВС и генератора топливного газа на основе металлгидридного водородного аккумулятора, термохимического реактора конверсии и испарителя метанола, использующие в качестве компонент как математические модели рабочего процесса ДВС, так и систему универсальных вычислительных модулей, рассмотренных выше.

Структурная схема металлгидридной системы хранения (МГСХ) приведена на рис. 14. В соответствии с этой схемой охлаждающая жидкость из системы охлаждения двигателя 1 с температурой  $T_1$  поступает в подогреватель 2, в который подаются отходящие газы при температуре  $T_{ог}$ . Подогретая до температуры  $T_2$  охлаждающая жидкость подается в МГСХ. В результате нагрева металлгидрида 4 происходит десорбция водорода в буферную полость 5 и далее через дозатор 6 осуществляется отбор водорода во впускной коллектор 7.

Узким местом системы ДВС - МГСХ является режим запуска ДВС

и разогрева МГСХ, что обусловлено значительной конструктивной массой. Упрощенная модель холодного пуска системы ДВС - МГСХ основывалась на следующих допущениях:

- металлгидрид элемента пусковой системы имеет во всех точках одинаковую температуру  $T$ , совпадающую с температурой водорода в буферной полости, образованной пористой структурой металлгидрида;

- водород и металлгидрид находятся в состоянии динамического равновесия.

При этих допущениях получено дифференциальное уравнение нагрева металлгидридного элемента

$$[m_r c_r + \psi(q_w + c_p T)] \frac{dT}{dt} = q - G_H(q_w + c_p T), \quad (26)$$

где  $m_r$ ,  $c_r$  - масса и теплоемкость металлгидрида,  $q_w$  - теплота сорбции,  $q$  - интенсивность отбора теплоты от теплоносителя,  $G_H$  - массовый расход водорода,  $c_p$  - теплоемкость водорода,  $\psi(T)$  - заданная функция, зависящая от характеристик металлгидрида.

Температура охлаждающей жидкости  $T_j$ , в каждой из полостей определяется исходя из дифференциального уравнения теплового баланса, имеющего вид

$$m_j c_w \frac{dT_j}{dt} = G_w c_w (T_j - T_i) + q_i \quad (27)$$

$i, j = 1, 2, 3$

где  $m_j$  - масса теплоносителя в  $i$ -й полости,  $T_j$  - температура теплоносителя, поступающего в  $i$  полость,  $G_w, c_w$  - массовый расход и теплоемкость теплоносителя,  $q_i$  - интенсивность суммарного теплоподвода к теплоносителю в  $i$ -й полости, определяемая уравнениями Ньютона-Рихмана.

Коэффициенты теплоотдачи, входящие в соотношения для интенсивностей теплообмена определяются исходя из общепринятых методик, широко используемых при расчетах теплотехнических устройств. Теплоотдача от рабочего тела ДВС к охлаждающей жидкости,

температура и расход отработавших газов определяются в результате численного моделирования рабочего процесса на ПЭВМ.

Численные эксперименты показали, что определяющим фактором, влияющим на длительность прогрева МГСХ, является расход водорода через двигатель в режиме прогрева. На рис. 15 показаны области, характеризующие различные условия запуска и прогрева. Область I, соответствует провалу давления водорода более 0.1 МПа в начале запуска. Область II соответствует режимам, при которых длительность прогрева двигателя составляет более 10 мин, и область III можно рекомендовать в качестве рабочей поскольку прогрев достигается за короткое время при незначительном спаде давления в МГСХ. Металлогидридная система аккумулирования водорода с жидкостным теплоносителем была реализована на автопогрузчике 4092 с двигателем УМЗ 451МП. Одним из путей повышения устойчивости работы водородного ДВС является увеличение степени сжатия, приводящее к снижению температуры отработавших газов. Для определения соотношения между предельным коэффициентом избытка воздуха и повышением степени сжатия, обеспечивающих устойчивую работу двигателя на водороде, были проведены экспериментальные и численные исследования рабочего процесса, суть которых сводилась к оценке минимальной температуры остаточных газов, при которой обратная вспышка не возникала. В результате получена взаимосвязь между величиной степени сжатия и коэффициентом избытка воздуха, обеспечивающих устойчивую работу двигателя на номинальном режиме

$$\epsilon = 5.88 \alpha + 1.003 \alpha \epsilon_0 - 0.1665 \epsilon_0 - 4.64 ,$$

где  $\epsilon_0$  - степень сжатия базового варианта.

Одним из вариантов применения метанола в качестве топлива является его каталитическая конверсия в водородсодержащую газовую смесь. Газификация метанола осуществляется в реакторе, представляющем собой теплообменник трубчатого типа, заполненный ка-

тализатором и обогреваемый отработавшими газами двигателя. Основными проблемами при разработке такой системы питания является организация высокой и стабильной степени конверсии метанола, а также согласование инерционного газогенератора с транспортным двигателем, работающим в широком диапазоне частот и нагрузок.

Структурная схема системы "двигатель-реактор" представлена на рис. 16. Жидкий метанол из бака 1 под давлением  $p_M$ , определяемым источником давления 2, поступает в реактор 3. Из реактора продукты конверсии через дозатор 4 поступают во впускной коллектор 5, в который через дроссельную заслонку 6 штатного карбюратора, поступает воздух из атмосферы. Отработавшие газы двигателя 7 поступают в межтрубное пространство реактора.

Математическая модель топливовоздушного тракта основана на следующих упрощающих предположениях:

- все компоненты заряда представляют собой идеальные газы;
- реактор, впускной коллектор, межтрубное пространство представляют собой элементы с сосредоточенными параметрами.

Система уравнений, описывающих каждую из полостей, представляет собой дифференциальные уравнения баланса энергии и массы

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= G_{вх} i_{вх} - G_{вых} i + q \\ \frac{dm}{dt} &= G_{вх} - G_{вых} \end{aligned} \quad (28)$$

где  $U, i, m$  - внутренняя энергия, удельная энергия и масса газа в полости,  $G_{вх}$  и  $G_{вых}$  - интенсивности массового расхода на входе и выходе из полости,  $i_{вх}$  - удельная энтальпия поступающего газа,  $q$  - интенсивность теплоподвода.

Дифференциальные уравнения (28) дополнены уравнениями газового состояния

$$p V = m R T \quad (29)$$

и калорическими уравнениями состояния

$$\begin{aligned} U &= m u(T) \\ i &= i(T) \end{aligned} \quad (30)$$

Тепловые потоки между полостями определяются на основании закона Ньютона-Рихмана, а расходы газа - через регулирующие сечения дозатора топлива и дроссельную заслонку численно, с помощью стандартного модуля IST.

Массовый расход заряда через двигатель и энтальпия отработавших газов определяются численно в зависимости от температуры, давления и состава заряда во впускном коллекторе, а также от частоты вращения коленчатого вала.

Интегрирование полной системы дифференциальных уравнений топливopодающей системы и рабочего процесса ДВС позволило оценить требуемые проходные сечения для метанола, газа и воздуха, а также получить зависимости между сечениями дозатора топлива и воздушного тракта, обеспечивающие требуемый коэффициент наполнения и коэффициент избытка воздуха.

Полученные результаты явились основой для экспериментального конвертирования двигателя ЗМЗ-402 на пары метанола. Нагрузочные характеристики двигателя ЗМЗ-402 при работе на бензине и парах метанола представлены на рис. 17. Как видно из характеристик эффективный КПД метанольного ДВС существенно превышает КПД бензинового, приближаясь к дизельным значениям, что обусловлено обеднением топливовоздушной смеси до  $\alpha=1,3+1,5$  и улучшенным смесеобразованием благодаря предварительному испарению.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Вовлечение в сферу практического применения на транспорте альтернативных энергоносителей, в том числе водорода, коксового и синтез-газа, метанола, является важной народно-хозяйственной проблемой, решение которой способствует комплексному решению энергетической и экологической проблем автомобильного транспорта.

2. Анализ моторных свойств альтернативных топлив, которыми может располагать Украина, показывает принципиальную возможность конвертирования современных бензиновых двигателей на водородсодержащие газы и как переходной вариант - на бинарное топливо, состоящее из бензина и альтернативного, подаваемых в двигатель раздельно или в смеси. Применение таких топлив позволяет осуществлять рабочий процесс двигателя при обедненных топливовоздушных смесях, что способствует повышению топливной экономичности и снижению токсичности отработавших газов.

3. Многообразие альтернативных топлив и значительный разброс их термодинамических свойств и скоростей сгорания предопределило создание универсальных математических моделей синтеза и анализа рабочих процессов ДВС на альтернативных топливах, рассчитанных на произвольные составы топливовоздушных смесей. В связи с этим разработан комплекс универсальных вычислительных модулей, позволяющих автоматизировать ряд наиболее сложных фрагментов, возникающих при различных подходах к решению задач моделирования и идентификации рабочих процессов для широкого класса топливоокислительных композиций.

4. Разработана новая концепция представления динамики процессов преобразования энергии и взаимодействия рабочего вещества с окружающей средой в виде энергетической диаграммы, дающей наглядное представление о ходе процесса сгорания, теплопередачи, механической работы, диссоциации и рекомбинации в каждой точке угла поворота коленчатого вала. Разработана методика построения энергетической диаграммы по известной индикаторной.

5. Описание процесса сгорания альтернативных топлив в виде полуэмпирических и эмпирических соотношений в большинстве случаев не представляется возможным ввиду отсутствия достаточного объема экспериментального материала. Кроме того, такой подход к

моделированию процесса сгорания никак не учитывает конфигурацию камеры сгорания и расположение источника воспламенения. Более конструктивным представляется подход, основанный на объемном законе тепловыделения, получаемом в результате решения задачи о пересечении сферической поверхности фронта пламени с поверхностью надпоршневого пространства. Разработана многозонная модель процесса сгорания, основанная на определении величин последовательно выгорающих сферических слоев заряда. Модель учитывает диссоциацию продуктов сгорания в каждой из зон. Концентрации оксида азота определяются зонно на основе кинетического механизма.

6. Для моделирования рабочих процессов ДВС на альтернативных топливах необходимая информация о законах теплообмена между рабочим веществом и элементами конструкции и выгорания топливовоздушного заряда может быть получена исходя из экспериментальной индикаторной диаграммы. Разработана методика оценки параметров в законах теплообмена и выгорания заряда, учитывающая разделение рабочего тела на две зоны, а также диссоциацию продуктов сгорания. Сформулирована концепция дуальности алгоритмов моделирования и идентификации рабочих процессов, позволяющая оценивать их совместимость и предложен один из возможных вариантов дуальной системы алгоритмов.

7. Разработана математическая модель динамических процессов в системе "двигатель-металлогидридный аккумулятор водорода", позволяющая оценить влияние конструктивных факторов на динамические характеристики металлогидридного аккумулятора с жидким теплоносителем. Результаты проведенных исследований использованы при создании экспериментального образца малотоксичного автоподручника, отличающегося от предыдущих разработок повышенным запасом водорода, жидкостной системой теплоснабжения металлогидридного аккумулятора, повышенной устойчивостью по отношению к не-

контролируемому воспламенению топливовоздушной смеси на впуске.

8. Впервые проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования статических и динамических характеристик автомобильной энергоустановки с термодинамическим реактором конверсии метанола. В результате проведенных исследований создана топливная аппаратура, позволяющая осуществлять питание двигателя как бензином, так и продуктами конверсии метанола. Исследования показали, что наиболее узким местом является катализатор конверсии метанола. В настоящее время катализатор, удовлетворяющий одновременно всем требованиям по рабочим температурам, механической прочности и массо-габаритным показателям, накладываемым условиями его функционирования совместно с ДВС, отсутствует. Для отработки топливной аппаратуры в условиях переменных режимов проведено опытное конвертирование микроавтобуса РАФ-2203 на паробразный метанол. Проведенный комплекс стендовых и лабораторно-дорожных испытаний показал высокие технико-экономические и экологические показатели метанольного ДВС. Благодаря значительному обеднению топливовоздушной смеси и улучшенному смесеобразованию эффективный КПД возрос на 20-25% по сравнению с бензиновым прототипом.

Основные положения диссертации получили отражение в следующих работах:

1. Куценко А. С. Моделирование рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания на ЭВМ. - Киев: Наук. думка, 1988. -100 с.

2. Стрелков И. В. , Юрченко А. П. , Куценко А. С. Некоторые методы управления процессом преобразования энергии в тепловых двигателях с целью повышения их энергетических характеристик и снижения прочности/Сб. Защита воздушного бассейна от загряз-

нения токсичными выбросами транспортных средств. - Харьков, 1977, Т.2. - С. 17-29.

3. Варшавский И. Л., Стрелков И. В., Куценко А. С. Об организации многокаскадных систем преобразования энергии // Авиасамолетостроение. Техника воздушного флота. - 1978. - №42. - С. 19-20.

4. Куценко А. С., Адашевская Л. И., Умеренкова К. Р. Математическое моделирование процессов образования токсических веществ в ДВС // Пробл. машиностроения. - 1983. - Вып. 20. - С. 41-44.

5. Куценко А. С. О влиянии параметров функции тепловыделения Вибе на термический КПД цикла поршневого двигателя // Пробл. машиностроения. - 1984. - Вып. 22. - С. 96-100.

6. Куценко А. С., Беус А. Я. Об анализе согласования элементов дизельгазотурбинной энергоустановки // Ин-т проблем машиностр. АН УССР. - Харьков, 1982. - 6 с. - Деп. в ЦНИИТЭИ тракторсельмаше 10.04.82.

7. Куценко А. С., Мищенко А. И., Левтерова Л. И. Численный метод определения равновесного состава продуктов сгорания водородного ДВС // Пробл. машиностроения. - 1988. - Вып. 29. - С. 83-86.

8. Куценко А. С., Левтерова Л. И., Русанов И. В., Аврутина Т. С. Об одной численной модели рабочего процесса ДВС с искровым зажиганием // Пробл. машиностроения. - 1990. - Вып. 34. - С. 97-101.

9. Kucenko A. S., Savitsky V. D., Baykov V. A. Hydrogen internal combustion engine with external mixture formation // Proceeding the International conference on new and renewable energy, Beijing, China, 1990.

10. Куценко А. С., Савицкий В. Д., Байков В. А. Динамика запуска водородного ДВС с металлгидридной системой хранения во-

дорода // Вопросы атомной науки и техники. Сер. ядерн. техн. и технология. - 1991. - Вып. 1. - С. 69-71.

11. Куценко А. С., Гнилицкий С. Ф., Костова Т. М. Комбинированное смесеобразование в двигателях внутреннего сгорания // Вопросы атомной науки и техники. Сер. ядерн. техн. и технология. - 1991. - Вып. 2. - С. 26-28.

12. Кузнецов В. М., Куценко А. С., Савицкий В. Д. С водородным двигателем // Автомобильная промышленность. - 1991. - № 5. - С. 11-16.

13. Куценко А. С., Левтерова Л. И. Прогнозирование технико-экологических характеристик ДВС на водородсодержащих топливных смесях // Пробл. машиностроения. - 1992. - Вып. 38. - С. 86-89.

14. Belogub A., Epifanov S., Kucenko A. Usage of hydrogenous gases as additional fuel for gasoline vehicle engines // 9 th world Hydrogen energy conference, Paris, 1992.

15. Куценко А. С. Техничко-экологические показатели автомобилей с газожидкостными топливными системами // Эффективность сжигания топлив и экология. - 1993. - Вып. 1. - С. 155-160.

16. Подгорный А. Н., Канило П. М., Куценко А. С. и др. Пути создания экологически чистого автомобиля с карбюраторным двигателем // Эффективность сжигания топлив и экология. - 1993. Вып. 1. - С. 149-154.

17. Kucenko A., Talda G. Some results of investigating the working process of an internal combustion gasoline -hydrogen engine // Hydrogen Power Systems International Symposium. Cassino. Italy. 1995.

18. А. С. N1206458, СССР, F 02 M 23/03 Способ работы двигателя внутреннего сгорания Мищенко А. И. // Байков В. А., Куценко

А. С. и др. Зарегистр. в Гос. реестре изобр. СССР 23 января 1986г.

19. А. С. N1239387, СССР, F 02 M 25/02 Двигатель внутреннего сгорания // Кудряш А. П., Мараховский В. П., Овечкин В. В., Куценко А. С. Зарегистр. в Гос. реестре изобр. СССР 22 февраля 1986 г.

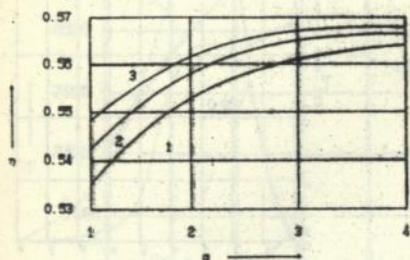
20. А. С. N 237722, СССР, F 02 M 28/01 Энергоустановка // Стрелков И. В., Куценко А. С. Зарегистр. в Гос. реестре изобрет. СССР 2 июня 1986 г.

21. А. С. N 1327627, СССР, F 02 M 08/10 Двигатель внутреннего сгорания // Кудряш А. П., Мараховский В. П., Куценко А. С., Овечкин В. В. Зарегистр. в Гос. реестре изобрет. СССР 1 апреля 1987 г.

22. Пат. № 2006608, РФ, F 02 B 43/08. Способ питания двигателя внутреннего сгорания // Куценко А. С., Русанов И. В. Зарегистр. в Гос. реестре изобр. РФ 30 января 1994 г.

23. Пат. № 2008464, РФ, F 02 B 43/08. Способ эксплуатации двигателя внутреннего сгорания // Куценко А. С., Русанов И. В. Зарегистр. в Гос. реестре изобр. РФ 28 февраля 1994 г.

24. Пат. № 2006607, РФ, F 02 B 43/08. Способ конвертирования двигателя внутреннего сгорания // Куценко А. С., Савицкий В. Д., Байков В. А. и др. Зарегистр. в Гос. реестре изобр. РФ 30 января 1994 г.



1.  $\beta=0$  2.  $\beta=0.25$  3.  $\beta=1$

Рис. 1.

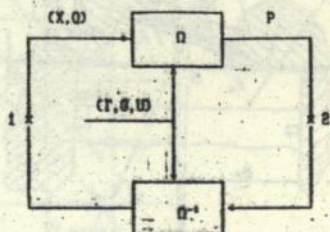


Рис. 2.

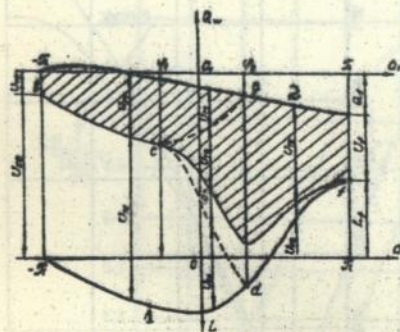


Рис. 3.

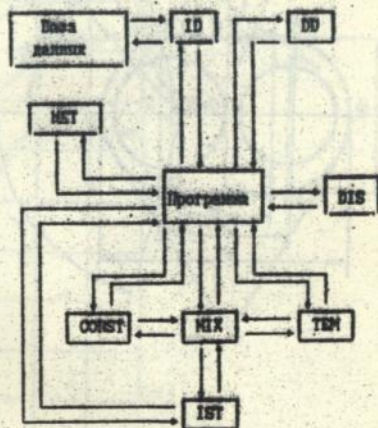


Рис. 4.

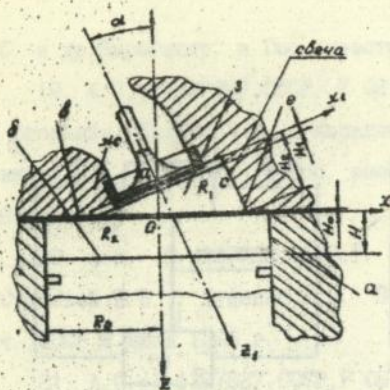


Рис. 5.

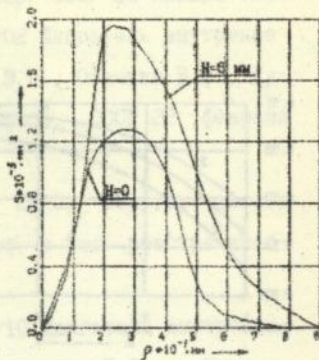


Рис. 7.

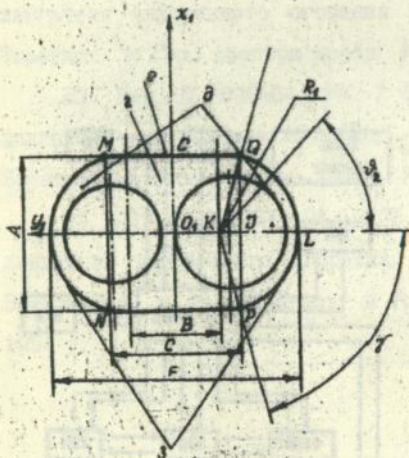


Рис. 6.

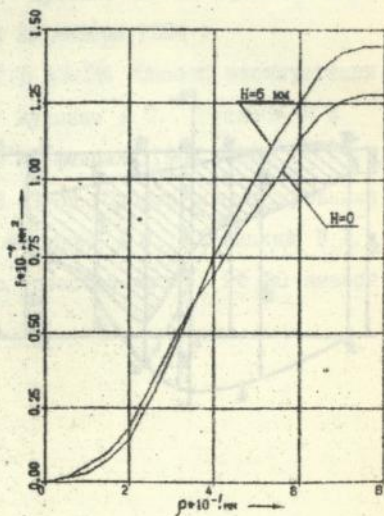


Рис. 8.

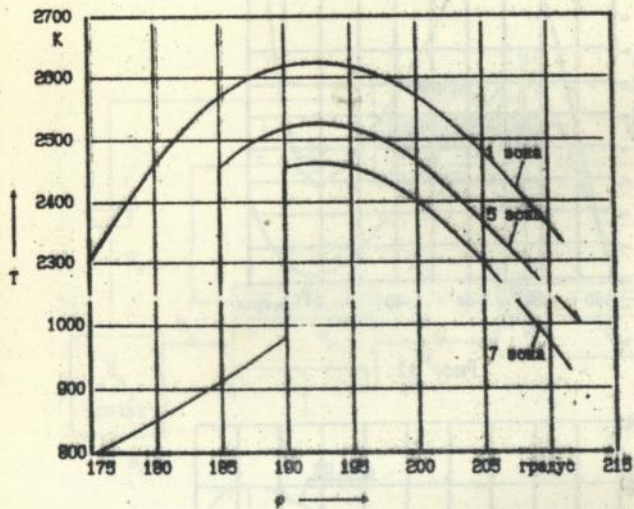


Рис. 9

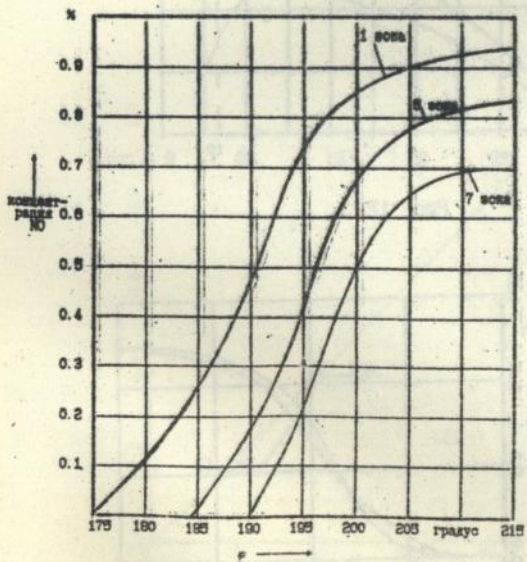


Рис. 10

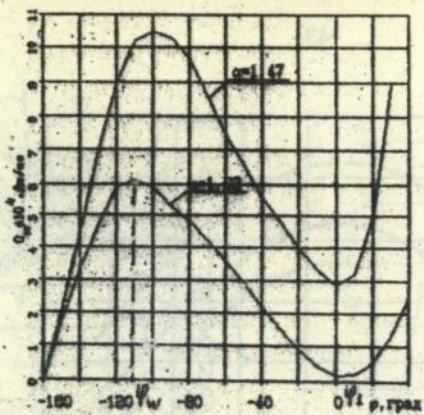


Рис. 11.

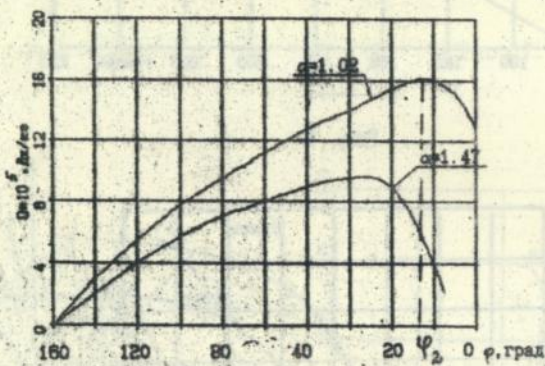


Рис. 12.

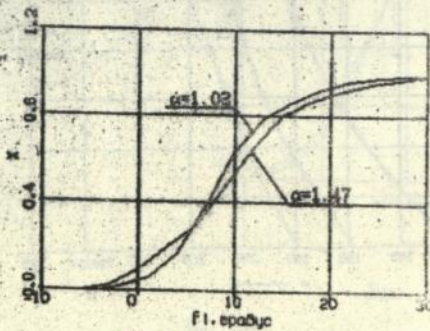


Рис. 13.

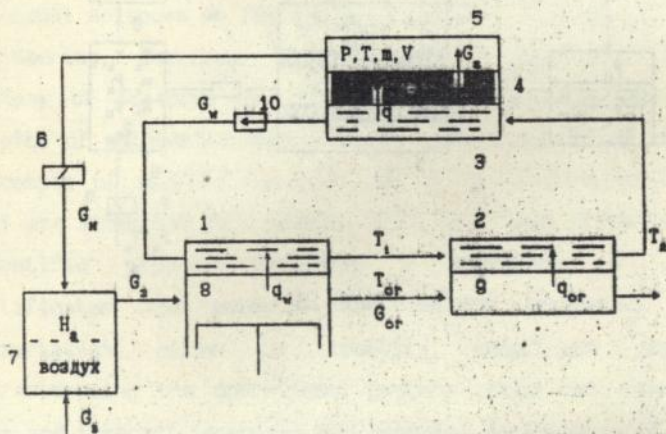


Рис. 14.

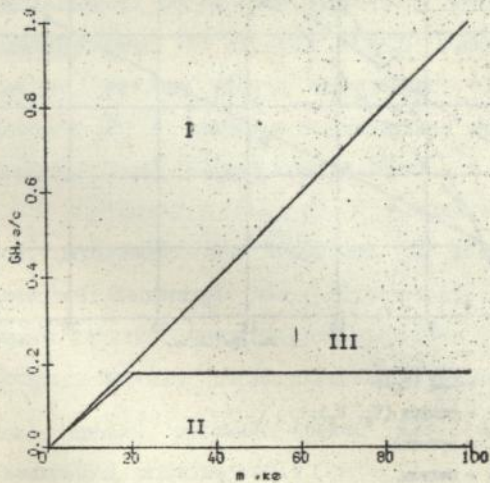


Рис. 15.

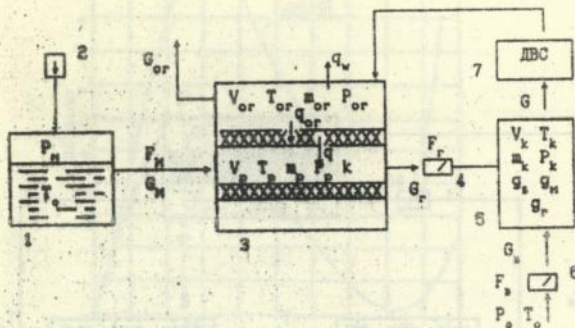
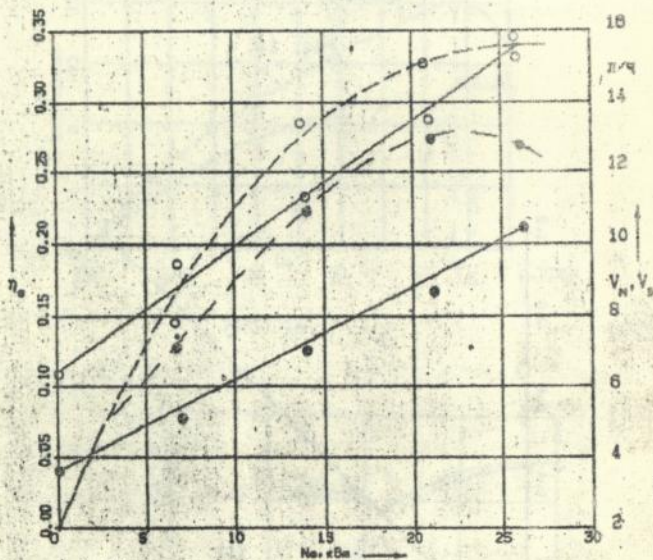


Рис. 16.



- КПД ( $\eta_e$ );
- расход ( $V_M, V_B$ );
- o - метанол;
- - бензин.

Рис. 17.

Kutsenko A.S. Mathematic Modeling and Identification of Internal Combustion Engines operation processes Using Alternative Types of Fuel. The dissertation for presenting Doctor's Degree of technical sciences on Speciality 05.14.05 - Theoretical Thermal Engineering, Institute for Problems in Machinery, National Academy of Sciences of Ukraine. Kharkov, 1966. Methods and results of mathematic modeling and identification of operation processes of sparkle ignition ICE using alternative types of fuel are submitted for defense which have been presented in 37 scientific papers, including a monograph, 7 author's certificates and patents. The methods suggested in the dissertation allow to identify indefinite parameters characterizing the operational process using the experimental data and forecast technical and economic performance of the ICE employig a wide spectrum of alternative fuels.

Куценко О.С. Математичне моделювання та ідентифікація робочих процесів ДВЗ на альтернативних паливах.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.14.05 - теоретична теплотехніка, Ін-т проблем машинобудування НАН України, Харків, 1996.

На захист винесено методи моделювання та ідентифікації робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням на альтернативних паливах, викладені в 37 наукових роботах, в тому числі 1 монографії, 7 авторських свідоцтвах і патентах. Методи, що пропонуються, дозволяють ідентифікувати за експериментальними даними невизначені параметри, які характеризують робочий процес, і прогнозувати техніко-економічні та екологічні показники ДВЗ, що використовують широкий спектр альтернативних палив.

Ключові слова: робочий процес ДВЗ, альтернативні палива, моделювання, ідентифікація.

Ав 34.627

Ответственный за выпуск к. т. н. Шупиков А. Н.

---

Подп. к печати 15.04.96. Формат 60\*90 1/16

Бумага печ. №1. Усл. печ. лист. 2.0. уч.-изд. лист. 2.0.

Тираж 100 экз. зак. № 113

---

Ротапринт Института проблем машиностроения НАН Украины

310046, Харьков, ул. Дм.Пожарского, 2/10