

**ХАРЬКОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

**ПЕЛЕПЕЙЧЕНКО Владимир Игоревич**

**УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРОЦЕССОВ ГАЗООБМЕНА**

05.04.02 - тепловые двигатели

**АВТОРЕФЕРАТ**

**ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Харьков - 1995

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00761588 (Z)

0569  
715353

Работа выполнена на к...  
ДВИГАТЕЛИ" Харьковской го...  
дорожного транспорта.

Научный консультант - доктор технических наук,  
профессор САХАРЕВИЧ В.Д.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор ДРАГАНОВ В.Х.

- доктор технических наук,  
профессор БАГМУТ Г.А.

- доктор технических наук,  
профессор СТЕФАНОВСКИЙ Б.С.

Ведущая организация - Институт проблем машиностроения  
НАН Украины, г. Харьков

Защита состоится "22" дек. 1995г. в 13. часов в  
ауд. 113 на заседании специализированного совета Д 02.15.02  
по тепловым двигателям при Харьковской государственной  
академии железнодорожного транспорта, 310050,  
г. Харьков-50, пл. Фейербаха 7.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в  
библиотеке Харьковской государственной академии железнодо-  
рожного транспорта.

Автореферат разослан "22" ноябр. 1995г.

Ученый секретарь специализированного совета Д 02.15.02,  
к. т. н., доц.

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

ЛЯЛЮК В.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ, АКТУАЛЬНОСТИ И СТЕПЕНИ ИССЛЕ- ДОВАННОСТИ ТЕМАТИКИ

Необходимым условием получения высоких технико-экономических и экологических показателей дизеля является обеспечение требуемых показателей газообмена. Для оценки качества газообмена используют показатели, основными из которых являются коэффициент избытка воздуха при сгорании, коэффициент остаточных газов, коэффициент наполнения, отнесенный к условиям во впускном ресивере, коэффициент продувки.

Перечисленные показатели являются интегральными, так как характеризуют итог сложных нестационарных процессов, протекающих в цилиндре и коллекторах в период газообмена. Однако они не несут никакой информации о характере движения заряда в цилиндре в разные моменты времени и в камере сгорания (КС) в период топливоподачи.

В настоящее время общепризнано исключительно важное значение организованного движения заряда для качественного смесеобразования и достижения высокого индикаторного КПД.

При проектировании и доводке двигателей возникает проблема количественной оценки влияния конструктивных и режимных факторов на показатели газообмена и локальные значения параметров состояния заряда в цилиндре и КС. Кроме информации о полях скоростей в некоторых случаях необходимы данные о локальных значениях температуры и концентрации остаточных газов или топлива.

Применение эффективных методик расчета указанных пара-

метров дало бы возможность повысить уровень проектирования, целенаправленно формировать характеристики двигателей.

Течение заряда в цилиндре и КС в общем случае представляет собой нестационарное трехмерное турбулентное движение газовой смеси, сопровождающееся трением о стенки и теплообменом при изменяющихся во времени граничных условиях.

В настоящее время существует ряд нерешенных принципиальных проблем, связанных как с построением математической модели такого течения, так и с выбором эффективного метода решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, образующих модель.

Известные методы расчета носят либо частный характер, либо имеют недостаточную точность, что ограничивает возможность их эффективного применения.

В представленной диссертационной работе содержится развитие и обобщение методов расчета внутрицилиндровых течений, что позволило повысить их точность и расширить область применения на новый класс задач. Внедрение в практику проектирования созданного на основе теоретических разработок программного комплекса позволяет квалифицировать работу как актуальную, направленную на решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное прикладное значение - снижение затрат на создание и доводку дизелей и повышение их технического уровня за счет рационального выбора параметров, определяющих характер процессов газообмена.

## ЦЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целями исследования являются:

1. Разработка программного комплекса, позволяющего на стадии проектирования определять интегральные показатели газообмена и локальные значения параметров состояния заряда в цилиндре и камере сгорания в периоды газообмена и сжатия.

2. Изучение основных особенностей и закономерностей внутрицилиндровых течений заряда в двигателях разных типов и разработка практических рекомендаций по повышению их технико-экономических показателей.

Для достижения указанных целей необходимо было решить следующие основные задачи.

1. Разработать метод решения системы уравнений, входящих в математическую модель, описывающую нестационарное трехмерное турбулентное течение двухкомпонентного сжимаемого газа.

2. Разработать метод учета турбулентного обмена в модели нестационарного течения.

3. Обосновать выбор модели / гипотезы / турбулентности, учитывающей особенности течения в цилиндре ДВС.

4. Уточнить, а в необходимых случаях разработать способы задания граничных и начальных условий.

5. Разработать и отладить комплекс прикладных программ, реализующих математическую модель течения заряда в цилиндре.

6. Разработать методику проведения исследования по выбору параметров системы воздухообеспечения конкретного двигателя.

7. Разработать методику количественной оценки степени равномерности распределения топлива в объеме камеры сгора-

ния.

## ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОЛОГИИ, МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДМЕТА И ОБЪЕКТА

Предмет исследования - вопрос о связях между конструктивными особенностями двигателя, режимом его работы и мгновенными локальными параметрами заряда в цилиндре в периоды газообмена и сжатия.

Объект исследования - цилиндры четырехтактных и двухтактных двигателей.

Методология исследования - моделирование газодинамических процессов.

Метод исследования - расчет на ЭВМ мгновенных локальных параметров потока в цилиндре, использование экспериментальных данных для идентификации математических моделей и подтверждения теоретических выводов.

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРАКТИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ, ЕГО НАУЧНОЙ НОВИЗНЫ

Теоретическую ценность имеет методика математического моделирования нестационарного пространственного турбулентного течения двухкомпонентного сжимаемого газа в замкнутой области сложной и меняющейся во времени формы при нестационарных граничных условиях.

Практическую ценность имеют:

- программный комплекс, позволяющий рассчитывать локальные параметры потока в цилиндре и КС (скорость, концентрацию, давление, температуру, плотность, интенсивность турбулентности), а также интегральные показатели газообмена;

- методика оценки степени равномерности распределения компонентов смеси (топливо-воздух) в объеме КС;

- данные о закономерностях формирования полей параметров потока в цилиндрических КС дизелей автотракторного типа;

- уравнения регрессии, устанавливающие связь между показателями газообмена дизеля 6ДН12/2х12, режимом его работы и конструктивными параметрами окон;

- рекомендации по выбору параметров системы воздухо-снабжения и конструкции окон модификации транспортного дизеля 6ДН12/2х12, предназначенной для дизель-поезда.

- данные о характере распределения газообразного топлива в объеме камеры сгорания дизеля 6ГЧН31,8/33.

Научную новизну имеют:

1. Алгоритм решения системы уравнений газовой динамики, объединяющий подходы методов крупных частиц (МКЧ) и распада произвольного разрыва (РПР).

2. Метод учета турбулентного переноса в математических моделях течения, ориентированных на использование алгоритмов методов расщепления по физическим факторам.

3. Метод коррекции масштаба турбулентности в модели Н.И.Булеева в зависимости от числа Ричардсона и формула для вычисления числа Ричардсона в условиях течения в цилиндре. Применение коррекции обеспечило учет влияния градиентов плотности, возникающих во вращающемся потоке, на пульсационную составляющую скорости.

4. Опытные данные о значении коэффициента трения движущегося воздушного заряда о стенку цилиндра.

5. Метод оценки степени равномерности распределения

компонентов газовой смеси в объеме КС и рабочие формулы для вычисления интегрального показателя равномерности.

6. Уравнения в форме полиномов второй степени, устанавливающие связь между конструктивными и режимными параметрами и показателями газообмена дизеля 6ТД (6ДН12/2х12).

7. Результаты исследования основных закономерностей эволюции локальных параметров внутрицилиндровых потоков в двигателях разных типов.

#### УРОВЕНЬ РЕАЛИЗАЦИИ, ВНЕДРЕНИЯ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК

Диссертация выполнена в соответствии с программой ГКНТ СССР N 535 от 16.05.89 "Создание и освоение производства новых типов двигателей внутреннего сгорания и агрегатов на их основе", постановлением СМ СССР N 1041 от 28.08.86 "О мерах по увеличению использования в XII пятилетке природного газа как моторного топлива", планами НИР и ОКР Харьковского конструкторского бюро по двигателестроению (ХКБД).

Результаты научного исследования в виде программ расчета локальных параметров заряда в цилиндре и интегральных показателей газообмена переданы в ХКБД, на Харьковский завод тракторных двигателей, в Головное специализированное конструкторское бюро по двигателям средней мощности, НТП КБ среднеоборотных двигателей, используются в практике НИР и учебном процессе в ХАРТАЖТ.

Рекомендации по выбору параметров системы воздухообеспечения и конструкции окон тепловозного варианта дизеля 6ДН12/2х12 переданы в ХКБД.

АПРОБАЦИЯ И ПУБЛИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ,  
СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Апробация работы. основные положения и результаты диссертационной работы доложены на Всесоюзных научно-технических конференциях:

"Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом", г. Харьков, 1979г.

"Создание и совершенствование быстроходных дизелей", г.Токмак, Квдизельмаш, 1982г.

"Современный уровень и пути совершенствования экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания", г.Луганск, 1983г.

"Теория и расчет мобильных машин и двигателей внутреннего сгорания", г. Тбилиси, 1985г.

"Актуальные проблемы развития двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок", г. Ленинград, 1990г.

на Международных научно-технических конференциях:

"Компьютер: наука, техника, технология, здоровье", Харьковский политехнический институт - Мишкольцкий университет, Венгрия, 1993г., 1995г.

на научно-технических конференциях Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта, 1979-1994гг.

Публикации: по результатам диссертационного исследования опубликована 21 научная работа.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных литературных источников, включающих 226 наименований.

Работа содержит 254 страницы основного текста,  
7 таблиц и 67 рисунков.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД В РАЗРАБОТКУ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ,  
ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ

В ходе выполнения работы лично автором получены следующие научные результаты, которые выносятся на защиту.

1. Метод решения системы уравнений газовой динамики, объединяющий подходы МКЧ и РПР.

2. Метод учета турбулентного переноса в математических моделях течения, ориентированных на использование алгоритмов методов расщепления по физическим факторам.

3. Метод коррекции масштаба турбулентности в модели Н.И.Булеева в зависимости от числа Ричардсона и формула для вычисления числа Ричардсона в условиях течения в цилиндре, позволяющие учесть влияние градиентов плотности газа, находящегося в поле массовых сил, на интенсивность турбулентности.

4. Методика обработки опытных данных об изменении поля скоростей заряда в процессе сжатия, позволяющая определить значение коэффициента трения воздуха о стенки цилиндра.

5. Метод оценки равномерности распределения топлива в объеме КС по суммарному числу столкновений молекул топлива и воздуха в единицу времени.

6. Методика проведения исследований по выбору параметров системы воздухообеспечения и конструктивных параметров окон тепловозной модификации дивеля 6ДН12/2х12.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Отмечен постоянный и устойчивый интерес ведущих исследовательских центров и фирм, таких как МГТУ, ХПУ, С-ПОПУ, ЧелПУ, С-ПБКИ, МАДИ, МАМИ, МИИТ, РИИЖТ, ХабиИЖТ, ХаПИ, ВгПИ, ВПИ, ЛИВТ, НИВТ, ВПИ, УФАИ, ХАИ, БелПИ, ЗаПИ, ХИМЭСХ, КАДИ, ХАДИ, АэИНГ, ПО "Э-д им. Мальшева", "Коломенский э-д", БМЭ, "Звезда", "Юждизельмаш", "Первомайскдизельмаш", "Пенздизельмаш", "Дальдизель", КАМАЗ, ГАЗ, ВгМЭ, ЦНИДИ, ХКБД, ГСКБД, ИПМаш, ИММ, НАТИ, НАМИ, AVL, Ricardo, Leyland, B&W, Fiat, Sulzer, GMT, GMC, Pielstick, Cummins, Perkins, и других к проблеме совершенствования процессов газообмена в двигателях разных типов, развития теории и методов исследования процессов движения заряда в цилиндре.

Обоснованы и сформулированы цели и основные задачи исследования, изложенные выше. Указаны возможные области расширенного применения результатов работы.

ПЕРВАЯ ГЛАВА содержит анализ известных методов расчета интегральных показателей газообмена и локальных параметров газового потока в цилиндре и камере сгорания.

Эти методы можно условно разделить на три основные группы:

- термодинамические;
- основанные на использовании уравнения закона сохранения момента количества движения заряда относительно оси цилиндра;
- газодинамические.

Показаны ограниченные возможности методов первой и второй групп. Сделан вывод, что только газодинамические методы позво

-ляют определять локальные параметры потока при течении в областях сложной формы.

Рассмотрена общая система уравнений газовой динамики, описывающая нестационарное трехмерное турбулентное течение вязкого сжимаемого газа.

Приведен список возможных допущений, которые используются для упрощения исходной системы.

Показано, как при принятии той или иной комбинации допущений из общей системы уравнений получаются частные модели, описанные в литературе и применявшиеся для решения конкретных задач. Выполнен анализ преимуществ и недостатков частных моделей, обусловленных уровнем соответствия или несоответствия принятых допущений реальной картине развития течения и на этой основе установлены границы применимости частных моделей.

Показано, что на сегодняшний день наиболее совершенными по установке являются модели турбулентного движения ваярда в цилиндре, предложенные в работах М.Г.Круглова, С.Р.Березина, О.Н.Агапитова, О.Н.Лебедева, А.В.Бастерса, В.П.Хлынина, М.А.Гороховского, С.Н.Чиркова, В.П.Закржевского, М.В.Дульгера, Е.М.Иткиса.

Для замыкания системы уравнений турбулентного движения должны быть использованы дополнительные соотношения, которые дают модели (гипотезы) турбулентности.

Проведен анализ преимуществ и недостатков известных моделей турбулентности и рассмотрен опыт применения этих моделей для расчетов течений в цилиндрах ДВС. Сделан вывод, что для решения прикладных задач целесообразно применять модели

локальной турбулентности, которые могут обеспечить хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента при минимальном усложнении полной системы уравнений. Особо выделена модель локальной турбулентности Н.И.Булеева, поскольку в отличие от других она учитывает особенности пространственного течения в каналах сложной формы. Однако эта модель еще не применялась для полностью замкнутых объемов, в том числе и для цилиндров ДВС. Эмпирические коэффициенты, входящие в модель, определены по данным о течении в трубах. Поэтому правомерность использования модели Н.И.Булеева для условий движения в цилиндре должна быть доказана.

Приведена классификация условий однозначности и сделан анализ практики их задания в известных работах. Показано, что задание условия "прилипания" потока на стенке при размерах сетки на 1...2 порядка больше толщины пограничного слоя приводит к искусственному, "схемному", увеличению толщины пограничного слоя, а следовательно, к искажению картины течения вблизи стенки. Выходом могло бы быть сгущение сетки в пристеночной области, однако это приводит к резкому увеличению общего числа узлов сетки и времени решения задачи.

Рассмотрен метод объединения аналитических решений для распределения скорости в пограничном слое с численным решением для основной области течения. Показано, что относительная погрешность в определении этим методом напряжений трения на стенке в условиях течения в цилиндре ДВС может достигать 250%.

На основании анализа литературных данных определены пути совершенствования модели течения заряда в цилиндре ДВС.

ВО ВТОРОЙ главе приведена классификация методов решения системы уравнении газовой динамики и рассмотрена практика применения этих методов для решения системы уравнений, входящих в известные математические модели, описывающие эволюцию параметров потока в цилиндре и КС. Показано, что чем сложнее постановка задачи, тем уже круг возможных методов.

Для нелинейной системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих нестационарное трехмерное турбулентное течение сжимаемого двухкомпонентного газа в области сложной и изменяющейся во времени формы при нестационарных граничных условиях необходимо применение численных методов. В настоящее время наибольшее распространение получили метод "крупных частиц" (МКЧ) О.М.Белоцерковского и Ю.М.Давыдова и метод "распада произвольного разрыва" (РПР) С.К.Годунова. Выполнено сопоставление этих методов. Отмечено, что каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. МКЧ, относясь к группе методов расщепления, позволяет использовать многопроцессорные ЭЕМ. Это качество особенно важно при решении многовариантных или оптимизационных задач. Но в МКЧ нет строгого обоснования формул для определения параметров на границах расчетных ячеек, что приводит к в случае расчетов пространственных течении к накоплению ошибок и потере устойчивости разностной схемы.

В методе РПР формулы на разрывах / на гранях ячеек / получены строго, но в предположении, что состав среды в смежных ячейках одинаков. Однако в случае расчета продувки цилиндра ДВС среду следует рассматривать как состоящую минимум из двух компонентов - воздуха и остаточных газов, причем нев-

бежно существование градиентов их концентрации. Метод РПР не ориентирован на применение многопроцессорных ЭВМ.

Разностные схемы обоих методов консервативны и обладают "схемной вязкостью", однако этой вязкости во многих случаях недостаточно для адекватного воспроизведения реальных диссипативных процессов, обусловленных переносом турбулентными молями массы, импульса, энергии и концентрации из одной области течения в другую. Практика применения метода РПР и МКЧ для расчета турбулентных течений многокомпонентных газов чрезвычайно ограничена.

Исходя из изложенного, в настоящей работе была поставлена задача разработки метода и алгоритма решения системы уравнения газовой динамики, в котором были бы соединены положительные свойства МКЧ и РПР и учитывался турбулентный обмен.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ содержит описание разработанной математической модели и программного комплекса для расчета показателей газообмена и характеристик движения заряда в цилиндре и КС. Приведен анализ причин худших результатов применения в алгоритме МКЧ разностных формул второго порядка точности по сравнению с формулами первого порядка. Использование формул второго порядка для расчета параметров на гранях ячеек эквивалентно принятию допущения о том, что малые возмущения в потоке распространяются со скоростями, большими скорости звука. Противоречие реальной физической картине и приводит к худшим результатам. В МКЧ скорость и давление на гранях ячейки определяется как среднеарифметическое значение по параметрам в двух смежных ячейках. Эти формулы введены без фи-

вического обоснования. При этом оказывается, что скорость на гранях не зависит явно от распределения давления по смежным ячейкам, а давление на грани не зависит явно от распределения скорости. Разумеется, существует неявная зависимость, однако она проявляется через один или более временных шагов. Временной сдвиг между изменением параметров в ячейках и реакцией на это изменение параметров на гранях ячейки может в условиях расчетов трехмерных течений приводить к неустойчивости разностной схемы.

В методе РПР параметры на разрывах, то есть фактически на гранях ячейки, определяются решением уравнений законов сохранения. Поэтому предлагается оставить алгоритм МКЧ, предусматривающий расщепление по физическим факторам на "эйлеров", "лагранжев" и заключительный этап, но параметры на гранях определять по формулам метода РПР. Могут использоваться либо линеаризованные формулы для "больших" величин, либо "акустическое" приближение, имеющее вид:

$$U_{i+1/2,j}^n = \left[ \frac{U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n}{2} \right] - \left\{ \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{2 \cdot \rho_0 \cdot C_0} \right\}, \quad (1)$$

$$P_{i+1/2,j}^n = \left[ \frac{P_{i,j}^n + P_{i+1,j}^n}{2} \right] - \left\{ \rho_0 \cdot C_0 \cdot \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n}{2} \right\}, \quad (2)$$

где  $U$  и  $P$  - скорость и давление;  $\rho_0$  и  $C_0$  - плотность и скорость звука.

Целые индексы означают, что данная величина относится к параметрам в ячейке, дробные - что данная величина относится к грани, например с номером .

Выражения в квадратных скобках полностью совпадают с формулами МКЧ для параметров на гранях. Выражения в фигурных скобках учитывают свойства газа и состояние потока в окрестности рассматриваемой точки.

Оценка относительных различий в определении параметров на гранях по методам РПР и МКЧ в условиях течения в цилиндре показала, что различие в скорости может достигать 16%, в то время как различие в давлении и плотности не превосходит 0,1%. Поэтому целесообразно корректировать только формулы для определения скорости на гранях ячейки.

Разработана методика учета турбулентного обмена. Известно, что в турбулентных течениях вне пограничного слоя коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии на несколько порядков превосходят соответствующие молекулярные коэффициенты, поэтому эффектами молекулярного переноса можно пренебречь. Тогда диссипативные процессы будут определяться переносом движущимися турбулентными молями массы, импульса и энергии из одной области течения в другую и последующим рассеиванием этих молей. Предлагается в алгоритм МКЧ включить механизм учета такого переноса.

Рассматривается система интегральных уравнений законов сохранения, имеющая вид:

ЛНБ им. В. Стефаника  
АН України

$$\int_V \frac{\partial p}{\partial \tau} \cdot dV + \int_S p \cdot u_n \cdot dS = 0, \quad (3)$$

$$\int_V \frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} \cdot dV + \int_S (\rho \cdot u) \cdot u_n \cdot dS + \int_S p \cdot n \cdot dS = 0, \quad (4)$$

$$\int_V \frac{\partial(\rho E)}{\partial \tau} \cdot dV + \int_S (\rho \cdot E) \cdot u_n \cdot dS + \int_S (p \cdot n) \cdot u_n \cdot dS = 0, \quad (5)$$

$$p = \varepsilon \cdot (\kappa - 1) \cdot \rho, \quad E = \varepsilon + \frac{u^2}{2}. \quad (6,7)$$

Принято, что через каждую из поверхностей, ограничивающих ячейку, во встречных направлениях движутся турбулентные моли, причем объем моля, покидающего ячейку, равен объему моля, входящего в ячейку через данную поверхность. Допущение о равенстве объемов молей, пересекающих границу ячейки, позволяет исключить на "эйлеровом" этапе учет работы их проталкивания. Турбулентность мелкомасштабная, то есть длина свободного пробега моля и его характерный размер меньше размеров ячейки. Моль, вошедший в ячейку, теряет свою индивидуальность. Из принятых допущений следует, что на поверхности каждой грани ячейки существует три участка с разными значениями нормальной составляющей скорости потока  $\bar{u}_n$ . Схема распределения скоростей приведена на рис.1.

На участке А скорость равна усредненной скорости на поверхности. На участках В и С скорости определяются из условий

$$u_{nB} = \bar{u}_n + u'_n,$$

$$u_{nC} = \bar{u}_n - u'_n,$$

где  $u'_n$  - пульсационная составляющая скорости. Поверхности участков связаны соотношением

$$S_B = S_C = \Psi S_0,$$

где  $\Psi$  - эмпирический коэффициент, характеризующий относительное сечение моля. При принятых допущениях  $\Psi \leq 0,5$ .

На практике возможны два варианта соотношения скоростей  $\bar{u}_n$  и  $u'_n$ . Вариант "а":  $|u'_n| < |\bar{u}_n|$  и вариант "б"  $|u'_n| > |\bar{u}_n|$ . При варианте "а" моли из ячейки, находящиеся "ниже" по течению, не могут проникать в ячейку, находящуюся "выше" по течению, так как сносятся потоком.

Учет турбулентного переноса осуществляется в случае, когда  $|u'_n| > |\bar{u}_n|$ .

На "лагранжевом" этапе вычисляются интегралы по поверхности ячейки, выражающие в формулах (3), (4), (5) потоки массы, импульса и энергии. Их можно представить в виде:

$$\int_S (\rho \cdot X) \cdot u_n \cdot dS = \sum_{i=1}^e (\rho_{i,[*]} \cdot \chi_{i,[*]}) \cdot \bar{u}_{ni} \cdot \Delta S_i + \\ + \sum_{i=1}^e \Psi \cdot [\rho_{i,b} \cdot \chi_{i,b} - \rho_{i,a} \cdot \chi_{i,a}] \cdot (|u'_n| - |\bar{u}_n|), \quad (8)$$

где  $e$  - число поверхностей, ограничивающих ячейку;

$\Delta S$  - площадь грани ячейки, ( $X=1$  для формулы (3),

$X=U$  для (4),  $X=E$  для (5)).

Свободный подстрочный индекс  $[*]$  означает, что данная величина соответствует параметрам ячейки, из которой происходит течение через поверхность с номером  $i$ , индекс "а" - что данная величина относится к параметрам в рассматриваемой ячейке, индекс "в" - что данная величина относится к параметрам в соседней ячейке.

Значение  $\Psi$  следует принимать равным 0,5. Физически это означает, что вся область течения охвачена турбулентным дви-

жением. Первая сумма в правой части (8) представляет поток, обусловленный усредненной скоростью, вторая - поток, вызванный турбулентными пульсациями.

Для практического использования формулы (8) необходимо каким-либо образом определить значение пульсационной скорости  $U'$ .

Анализ известных моделей турбулентности показал, что модель локальной турбулентности Н.И.Булеева позволяет учесть влияние формы области течения на величину пульсационной скорости. Согласно этой модели модуль пульсационной скорости определяется как

$$|U'| = \mu \cdot L \cdot \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} \right|, \quad (9)$$

где  $\mu$  - эмпирический коэффициент ( $\mu = 1,25$ ),  $\left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} \right|$  - модуль деформации поля скоростей усредненного движения;  $L$  - масштаб турбулентности, вычисляемый по формуле

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_{\Omega} \frac{1}{r} \cdot d\omega, \quad (10)$$

где  $r$  - расстояние от рассматриваемой точки до стенки канала в направлении, задаваемом углом  $\omega$ . В случае замкнутой области интегрирование необходимо выполнять в пределах телесного угла  $4\pi$ . Выполнено сопоставление расчетных значений пульсационных составляющих скорости, найденных по формуле (9), с опытными данными о распределении компонентов вектора скорости усредненного и пульсационного движений в цилиндрах и КС двигателей разных типов. Отмечено, что относительная разница расчетных и экспериментальных значений  $U'$  в некоторых случаях не превосходит 10...20%, а в некоторых

достигает 200% и более.

Сделан вывод, что причиной нестабильных результатов непосредственного применения модели (9) к течениям в цилиндре является отсутствия в ней учета влияния градиента плотности среды, находящейся в поле массовых сил, на характеристики турбулентности.

Градиенты плотности и массовые силы порождаются закруткой заряда относительно оси цилиндра. Для учета этих эффектов предложено корректировать масштаб турбулентности  $L$  с использованием формулы, аналогичной по своей структуре формуле Мони́на-Обухова, применяющейся в физике атмосферы:

$$L=L_0*(1+\beta\cdot Ri), \quad (11)$$

где  $L_0$ - масштаб, вычисляемый по формуле (10);  $\beta$  - опытный коэффициент;  $Ri$ - безразмерное число Ричардсона, вычисляемое по формуле

$$Ri=-\frac{g}{\rho}\cdot\left(\frac{\partial\rho}{\partial y}\right)\cdot\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\right)^{-2} \quad (12)$$

В диссертации приведен вывод формулы для определения локального значения  $Ri$  в условиях цилиндра и КС:

$$Ri=\frac{u_\varphi^4}{z^2\cdot c^2}\cdot\left(\frac{\partial\bar{u}_\varphi}{\partial n}\right)^{-2}, \quad (13)$$

где  $\bar{u}_\varphi$  - локальное значение тангенциальной составляющей скорости;  $z$  - расстояние до оси цилиндра;  $c$  - скорость звука при параметрах газа на оси цилиндра;  $\left|\frac{\partial\bar{u}_\varphi}{\partial n}\right|$  - деформация поля скоростей.

Установлено, что наилучшие результаты обеспечиваются при

$\beta = 0,4$ . Предложенная корректировка масштаба турбулентности позволила получить относительную разницу расчетных и экспериментальных данных о турбулентных пульсациях скорости, не превышающую во всех случаях 20%.

В разработанной модели принято, что на гранях пристеночных ячеек действуют напряжения трения, вызванные движением газа относительно стенки. Эти напряжения можно рассчитать по формуле

$$\tau_{\text{тр}} = C_f \cdot \frac{\rho \bar{u}^2}{2}, \quad (14)$$

где  $C_f$  - коэффициент трения,  $\bar{u}$  - скорость газа относительно стенки, определяемая по сеточным параметрам для пристеночной ячейки.

В литературе отсутствуют данные о значении  $C_f$  в условиях движения в цилиндре ДВС. Поэтому была разработана методика определения  $C_f$  по опытным данным об изменении параметров движущегося заряда при сжатии. Обработка опытных данных по двигателям разных типов позволила сделать вывод, что в диапазоне  $10^5 \leq Re \leq 10^6$   $C_f$  автомоделен по числу Рейнольдса и равен 0.012.

На основе изложенной методики разработан программный комплекс, ориентированный на ресурсы ИВМ РС АТ. Он состоит из двух основных модулей. Первый представляет собой программу расчета замкнутого рабочего цикла комбинированного двигателя, второй - программу расчета параметров движущегося в цилиндре заряда. В первом модуле реализована термодинамическая модель процессов, которая позволяет определять изменение во времени термодинамических параметров состояния рабочего тела в каждом из цилиндров, впускных и выпускных кол-

лекторах, трубопроводах в зависимости от набора большого числа конструктивных и режимных факторов. Модуль может использоваться и автономно для решения задач оптимизации параметров системы газотурбинного наддува. Но он не позволяет рассчитывать локальные параметры заряда в цилиндре. Роль первого модуля в программном комплексе заключается в определении начальных и граничных условий для расчета процессов течения заряда в цилиндре при газообмене.

Связь между модулями осуществляется через общую базу данных, из которой второй модуль получает информацию о давлении и температуре газа в коллекторах. Результат работы второго модуля - интегральные показатели газообмена и информация о полях давлений, температур, концентраций остаточных газов, компонент векторов скорости для любого момента времени процессов газообмена и сжатия. Данные о текущих локальных параметрах потока выводятся в процессе счета в графической форме на монитор в виде векторных полей скорости или в виде графиков, показывающих изменение по радиусу составляющих вектора скорости и доли остаточных газов. Это позволяет изучать развитие течения в цилиндре в динамике. Предусмотрена возможность получения в любой момент времени копии графического экрана на принтере.

Адекватность модели и программы расчета параметров движущегося заряда проверялась сопоставлением результатов расчета полей скоростей с экспериментальными данными.

Для примера на рис. 2 показаны опытные и расчетные графики изменения осевой и тангенциальной составляющих скорости в цилиндре дизеля 6ДН12/2х12 при его статической продувке. В

диссертации приведены результаты проверки на адекватность и по данным для двигателей других типов.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приведены примеры решения прикладных задач с использованием разработанного программного комплекса. Выполнен анализ структуры поля скоростей в цилиндрической КС дизеля 6ЧН 10,5/12. Рассмотрены варианты несмещенной и смещенной относительно оси цилиндра оси КС. Моделирование течения выполнялось на трехмерных сетках. На рис.3 показаны выведенные на принтер векторные поля скоростей в разные моменты сжатия. В нижней части рис.3 показана схема течения. На рис.4 приведены диаграммы изменения компонентов вектора скорости по радиусу на трех уровнях по глубине КС. Поле скоростей в смещенной КС не обладает осевой симметрией. В большей мере это относится к осевой составляющей, в меньшей - к тангенциальной, которая меняется не только по радиусу, но и по глубине камеры. Осевая и радиальная составляющие скорости вблизи стенок камеры малы. Поэтому основную роль в смесеобразовании играет тангенциальная составляющая, возникающая из-за предварительной закрутки заряда. Разрыв графика радиальной составляющей скорости в центре камеры на уровне А-А связан исключительно с принятым правилом знаков - скорость положительна, если ее вектор направлен от центра к периферии.

Информация о состоянии поля скоростей позволяет обоснованно выбрать направление топливных факелов.

Выполнено исследование по выбору параметров системы воздухообеспечения и конструкции окон транспортного двигателя

6ДН12/2х12, предназначенного для дизель-поезда.

В цилиндре двухтактного двигателя с прямоточной продувкой и закруткой заряда на впуске имеет место сложное пространственное турбулентное движение воздуха и остаточных газов. Существуют условия для образования плохо продуваемой зоны у оси цилиндра. В этой зоне может возникать вредное явление - течение, направленное навстречу основному потоку продувочного воздуха.

Для примера на рис. 5 показано векторное поле скоростей, на рис. 6 - диаграммы изменения компонентов вектора скорости и доли остаточных газов по радиусу цилиндра в сечении форсуночного пояса в период продувки при максимальном открытии продувочного окна.

Большой набор параметров, влияющих на газообмен, делает необходимым разработку методов, позволяющих на этапах проектирования и доводки определять их рациональное сочетание.

Ставилась задача установить, какими должны быть значения фаз газораспределения, давлений во впускном и выпускном коллекторах, наибольшего угла закрутки продувочного окна по высоте  $\varphi_3$ , чтобы на режимах тепловозной характеристики обеспечить заданное сочетание массы свежего воздуха в цилиндре  $M_s$ , коэффициента остаточных газов  $\gamma$ , коэффициента продувки  $\varphi_a$ , а также интенсивности движения заряда в КС в конце сжатия. За меру интенсивности движения заряда принималась  $\bar{V}_{\varphi_{max}}$  - максимальная величина тангенциальной составляющей скорости.

Рассмотрен вариант, когда закрытие выпускных и продувочных окон происходит одновременно. Тогда при постоянном угле заклинки коленчатых валов значение всех фаз газораспреде-

ления определяется какой-либо одной из них, например, углом начала открытия выходного окна  $\varphi_e$ .

Одновременная реализация заданных интегральных показателей газообмена и интенсивности движения заряда является необходимым условием получения высокого индикаторного КПД.

Задача решалась в три этапа. На первом выполнена серия расчетов процессов газообмена и сжатия при различных сочетаниях факторов, влияющих на газообмен. Сочетания задавались в соответствии с G-оптимальным планом пятифакторного эксперимента с варьированием на трех уровнях. Определены коэффициенты в уравнениях регрессии, устанавливающие зависимости

$$\left\{ \begin{array}{l} M_s = f_1(n, P_s, P_z, \varphi_e, \varphi_3) \\ \bar{U}_\varphi = f_2(n, P_s, P_z, \varphi_e, \varphi_3) \\ \gamma = f_3(n, P_s, P_z, \varphi_e, \varphi_3) \\ \varphi_a = f_4(n, P_s, P_z, \varphi_e, \varphi_3) \end{array} \right\}, \quad (15)$$

где  $n$  - частота вращения коленчатого вала.

Уравнение регрессии имеет вид полиномов второй степени с парным взаимодействием и каждое содержит 21 коэффициент.

На втором этапе для режима номинальной мощности ( $n=2200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $N = 552 \text{ кВт}$ ) определяли значения  $P_s, P_z, \varphi_e, \varphi_3$  обеспечивающие заданные значения  $M_s, \bar{U}_\varphi, \gamma, \varphi_a$ . Для этого численными методами

решали систему четырех нелинейных уравнений регрессии вида

(15). Получено, что заданные значения  $M = 4,2 \cdot 10 \text{ кг}$ ,  $\gamma = 0,06$ ,

$\varphi_a = 1,2$ ,  $\bar{U}_\varphi = 42 \text{ м/с}$  при  $n=2200 \text{ мин}^{-1}$  могут быть реализованы при  $P_s = 0,252 \text{ МПа}$ ,  $P_z = 0,22 \text{ МПа}$ ,  $\varphi_e = 108^\circ \text{ п.к.в.}$ ,  $\varphi_3 = 40^\circ$ .

На третьем этапе проверялись показатели газообмена, которые будут получены на режимах тепловозной характеристики.

При правильно подобранных параметрах системы воздухо-

снабжения не возникает обратных течений в осевой зоне и "перезавихрения" заряда в период топливоподачи.

На рис.7...рис.9 показаны параметры дизеля 6ДН12/2х12 по тепловозной характеристике в серийном и опытном вариантах. Реализация рекомендованных параметров системы позволила снизить удельный эффективный расход топлива на режимах тепловозной характеристики на 10..12 г/(кВт.ч).

Повышение экономичности достигнуто благодаря перераспределению воздуха, поступающего в двигатель - увеличению коэффициента избытка воздуха для сгорания и уменьшению коэффициента продувки.

Выполнен анализ влияния различия давлений воздуха на входе в продувочные окна, расположенные с противоположных сторон гильзы цилиндра дизеля 6ДН12/2х12, на интегральные показатели газообмена и состояние поля скоростей заряда.

Расчет течения выполнялся на трехмерной сетке. Приведены диаграммы распределения компонентов векторов скорости и доли остаточных газов по радиусу в различных сечениях цилиндра. Показано, что несмотря на возникающую асимметрию полей скоростей в цилиндре в период продувки, интегральные показатели газообмена, вычисленные с учетом неравномерности распределения и вычисленные по среднему давлению, практически одинаковы (относительная разница не превосходит 5%.)

Приведены результаты расчета локальных концентраций газообразного топлива (метана), подаваемого в цилиндр газодизеля Д50 (6ГЧН31,8/33) на такте впуска через клапан, установленный на месте клапана пневматического пуска. На рис.10 показано распределение локальных значений коэффициента из-

бытка воздуха в двух взаимно-перпендикулярных осевых сечениях цилиндра в момент начала подачи запальной порции жидкого топлива. В дизеле Д50 отсутствует предварительная закрутка заряда при впуске, а канал для подачи газа смещен от оси цилиндра к периферии. Это приводит к образованию вблизи выходного отверстия канала зоны, где локальные коэффициенты избытка воздуха меньше единицы. В процессе сжатия заряда равномерность распределения топлива в объеме КС несколько улучшается, однако из-за малой интенсивности движения заряда в цилиндре переобогащенная зона существует вплоть до момента начала подачи топлива.

Информация о локальных концентрациях газообразного топлива в КС позволяет оптимизировать процесс смесеобразования, верно выбирать ориентацию сопел распылителя форсунки, через которые подается жидкое запальное топливо, исключить его подачу в зоны, переобогащенные газообразным топливом.

Разработанный программный комплекс позволяет исследовать влияние конструктивных и режимных факторов на пространственное распределение концентраций газообразного топлива и проводить оптимизацию процесса смесеобразования.

ПЯТАЯ ГЛАВА посвящена разработке метода оценки равномерности распределения топлива в объеме КС.

В работах Ю.Б.Свиридова, А.С.Лышевского, Я.М.Майера, Н.Ф.Разлейцева, А.П.Кудряша, И.И.Тимченко, М.Л.Копылова, С.В.Сахаревича, Д.А.Москаленко и других предложены методики расчета локальных концентраций топлива в объеме КС в период топливоподачи. Характер макрораспределения топлива зависит от геометрии камеры, конструкции распылителей, характеристик

топливоподачи, интенсивности движения воздушного заряда. При проведении расчетов смесеобразования получают, как правило, серию различных макрораспределений и тогда возникает проблема их сравнения. Структура макрораспределений столь сложна, что без применения специальных методов невозможно дать им даже чисто качественную оценку, по принципу "более равномерно" или "менее равномерно" распределено топливо. Известные методы оценки равномерности исходят из двухзонной модели, которая предполагает, что какая-то часть воздуха доступна, а какая-то недоступна для сгорания. Локальный характер распределения внутри "доступной" зоны при этом не рассматривается.

Нами в качестве показателя равномерности распределения топлива предлагается использовать отношение числа столкновений в единицу времени молекул топлива в паровой фазе с молекулами воздуха при реальном распределении топлива в объеме

КС к числу столкновений, которое было бы при равномерном распределении того же количества топлива и воздуха в камере. При расчете числа столкновений следует учитывать только те из них, которые происходят в зонах, где концентрация топлива не выходит за пределы воспламенения.

В молекулярно-кинетической теории газов показано, что число столкновений молекул топлива и воздуха в единицу объема в единицу времени пропорционально произведению плотности

$\nu_1$  и  $\nu_2$  числа разнородных частиц

$$Z_0 \sim \nu_1 \cdot \nu_2. \quad (16)$$

С использованием соотношения для газовых смесей получена формула для вычисления показателя равномерности

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^{\ell} Z_i}{Z_{0\Sigma}} = \frac{\sum_{i=1}^{\ell} \frac{n_{i\ell} \cdot n_{iT}}{Z_i}}{n_{0\ell} \cdot n_{0T}}, \quad (17)$$

где  $\ell$  - число ячеек, в которых концентрация находится в пределах воспламенения;  $Z_i$  - относительный объем  $i$ -ой ячейки; число молей воздуха и топлива в элементарной ячейке с номером  $i$ ;  $n_{0\ell}, n_{0T}$  общее число молей воздуха и топлива в объеме КС.

Для случая, когда макрораспределение представлено в виде локальных коэффициентов избытка воздуха, получена формула

$$\xi = \frac{\left( d_{cp} L_0 \frac{\mu_T}{\mu_B} + x \right)}{1 - \frac{x}{d_{cp} L_0 \frac{\mu_T}{\mu_B} + x}} \cdot \prod_{i=1}^{\ell} \left( 1 - \frac{1}{d_i L_0 \frac{\mu_T}{\mu_B} + 1} \right) \cdot \frac{1}{\left( d_i L_0 \frac{\mu_T}{\mu_B} + 1 \right)}, \quad (18)$$

где  $d_{cp}$  и  $d_i$  - среднее по цилиндру и локальное значение коэффициента избытка воздуха;  $\mu_T$  и  $\mu_B$  - молекулярные массы топлива и воздуха;  $x$  - доля топлива, выгоревшего к данному моменту времени.

При равномерном распределении  $\xi = 1$ , при предельно неравномерном  $\xi = 0$ . Приведены примеры расчетов показателя равномерности. Для газодизеля 6ЧН31,8/33 с подачей газа на такте впуска через отверстие клапана пневмопуска  $\xi = 0,66$ , для камеры дизеля 10Д100  $\xi = 0,6$ , для открытой цилиндрической камеры дизеля 6ЧН10,5/12  $\xi = 0,38$ . Использование показателя равномерности позволяет выявить резервы совершенствования процесса смесеобразования.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. В цилиндрах ДВС, представляющих замкнутую область

сложной и меняющейся во времени формы в периоды газообмена и сжатия имеет место пространственное турбулентное течение многокомпонентной сжимаемой газовой смеси при нестационарных условиях взаимодействия со стенками /трение, теплообмен / и со смежными областями /впускным и выпускным коллекторами /.

При построении математической модели такого течения возникает проблема обоснованного выбора гипотезы турбулентности, способов задания начальных и граничных условий, констант, входящих в эмпирические формулы. Отсутствует единое мнение о целесообразности применения различных методов решения системы уравнений, входящих в математическую модель. Это сдерживает создание эффективных прикладных программ, позволяющих рассчитывать локальные параметры потока и интегральные показатели газообмена.

Создание методик расчета внутрицилиндровых течений и программных комплексов, позволяющих решать прикладные задачи-актуальная проблема теории ДВС.

2. Разработан метод решения системы уравнения газовой динамики, объединяющий подходы метода крупных частиц и метода распада произвольного разрыва. Суть этого метода в том, что сохраняется схема расщепления исходных уравнений по физическим факторам, свойственная МКЧ, но параметры на гранях ячеек определяются с использованием соотношений метода РПР.

Это позволяет получить устойчивую разностную схему, аппроксимирующую уравнения трехмерного течения газа.

3. Предложен метод учета турбулентного обмена в рамках общей модели, объединяющей подходы РПР и МКЧ. Метод предпо-

лагает выделение на "лагранжевом" этапе расчета из общих потоков через грань ячейки потока, вызванного усредненной скоростью, и потока, вызванного турбулентными пульсациями скорости. Пульсации скорости должны определяться с использованием какой-либо модели турбулентности. Из уравнений предложенного метода как частный случай получаются известные уравнения метода крупных частиц.

4. Обоснован выбор модели турбулентности для условия течения заряда в цилиндре ДВС. Показано, что модель локальной турбулентности Н.И.Булеева позволяет учесть специфику течения в замкнутом объеме сложной формы, каким является цилиндр и камера сгорания. Однако эта модель не применялась ранее для расчета закрученных течений, в которых существуют градиенты плотности потока. Это приводит в некоторых случаях к относительным погрешностям определения пульсационной скорости, превышающим 250 %.

Предложена формула для корректировки масштаба турбулентности в модели Н.И.Булеева в зависимости от числа Ричардсона, и формула для вычисления числа Ричардсона в условиях течения в цилиндре. Применение этих формул обеспечило погрешность определения пульсационной скорости не более 20 %.

5. На основании анализа опытных данных об изменении поля скоростей заряда в процессе сжатия в двигателях разных типов показано, что коэффициент трения газа о стенку автомоделен по числу Рейнольдса и равен 0,012. Сделан вывод о неравномерности использования аналогий с обтеканием пластин для вычисления коэффициента трения в условиях течения газа в ци-

линдре.

6. Разработана и отлажена программа расчета параметров нестационарного трехмерного турбулентного течения заряда в цилиндре в процессах газообмена и сжатия. Программа позволяет определять поля всех параметров газового потока, а также поля концентраций для любого момента времени. Рассчитываются также интегральные показатели газообмена.

7. Разработан программный комплекс, состоящий из модуля расчета замкнутого рабочего цикла многоцилиндрового дизеля с газотурбинным наддувом, охлаждением наддувочного воздуха, многоколлекторной выпускной системой и модуля расчета пространственного течения в цилиндре и камере сгорания в периоды газообмена и сжатия.

Модуль расчета замкнутого рабочего цикла дизеля обеспечивает определение начальных и граничных условий для расчета течения заряда в цилиндре. Связь между модулями осуществляется через общую базу данных.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволило сделать вывод, что относительная погрешность определения компонентов локальных усредненных скоростей не превосходит 15%, что приемлемо для решения прикладных задач.

8. Количественную оценку степени равномерности распределения топлива в объеме КС предлагается выполнять с помощью показателя равномерности, вычисляемого как отношение числа столкновений молекул топлива и воздуха при реальном распределении топлива к числу столкновений, которое было бы при равномерном распределении в объеме КС того же количества топлива и воздуха. Показатель равномерности позволяет срав-

нить макрораспределения топлива при различной организации процесса смесеобразования.

9. Выполнен теоретический анализ закономерности развития течения в цилиндрических камерах сгорания двигателей автотракторного типа. Исследовано течение в несмещенной и смещенной относительно оси цилиндра камере. Показано, что существуют градиенты тангенциальной составляющей скорости по глубине камеры. Смещение камеры относительно оси цилиндра приводит к асимметрии распределения осевых и радиальных составляющих вектора скорости вдоль радиуса КС, но тангенциальная составляющая остается осесимметричной.

10. В соответствии с планом пятифакторного эксперимента выполнена серия расчетов, позволивших получить уравнения множественной регрессии, связывающие интегральные показатели газообмена и характеристики движения заряда в камере дизеля 6ДН12/2х12 с конструктивными параметрами продувочных окон, параметрами газа во впускном и выпускном коллекторах, скоростным режимом работы двигателя. Уравнения имеют вид полиномов второй степени и содержат 21 коэффициент. Они могут быть использованы при создании различных модификации данного дизеля.

11. Разработаны рекомендации по выбору конструктивных параметров окон и параметров системы воздухообеспечения тепловозможной модификации дизеля 6ДН12/2х12. Требуемый уровень показателей газообмена и интенсивности вращения заряда в КС может быть получен при углах открытия выходного окна

$\varphi_e = 108^\circ$ , продувочного окна  $\varphi_s = 118^\circ$ , угле закрутки продувочного окна по высоте  $\varphi_3 = 40^\circ$ , давлении наддува

$P_3 = 0,252$  МПа, среднем давлении в выпускном коллекторе  
 $P_2 = 0,220$  МПа. Реализация указанных параметров позволила снизить удельный эффективный расход топлива по тепловозной характеристике на 10...12 г/(кВт.ч) по сравнению с базовым вариантом двигателя.

12. Исследовано влияние неравномерности распределения давления наддувочного воздуха у продувочных окон дизеля 6ДН12/2х12 на показатели газообмена. Показано что неравномерность приводит к асимметрии поля скоростей в цилиндре в период продувки. Однако интегральные показатели газообмена, вычисленные с учетом неравномерности распределения давления и по условному среднему давлению воздуха у окон практически одинаковы. Это позволяет выполнять расчет газообмена двигателя данного типа по среднему давлению у окон.

13. Выполнено исследование распределения метана в КС газодизеля Д50 при подаче газа на такте впуска через отверстие клапана пневмопуска. Показано наличие переобогащенных зон, при попадании в которые запальное жидкое топливо будет находиться вне пределов воспламенения. Определены значения показателя равномерности распределения газообразного топлива в КС.

14. Результаты работы в виде программного комплекса внедрены в Харьковском конструкторском бюро по двигателестроению, на Харьковском заводе тракторных двигателей, ГСКБ по двигателям средней мощности, НТП КБ среднеоборотных двигателей, используются при выполнении НИР и в учебном процессе в ХарГАЖТ. Рекомендаций по выбору параметров тепловозной модификации дизеля 6ДН12/2х12 внедрены ХКБД.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Пелепейченко В.И. Моделирование турбулентного движения заряда в цилиндре двигателя внутреннего сгорания на основе метода крупных частиц.- Харьк. гос. академия ж.-д. транспорта, Харьков, 1994.13с. Деп. в ГНТБ Украины, N 127-Ук 95, 16.01.95.

2. Пелепейченко В.И. Определение мгновенных параметров газового потока и характеристик турбин при исследовании дизелей с импульсными системами наддува.// Тезисы докладов Всесоюзной научно-технич. конф."Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом".- Харьков, 1979.-С.193.

3. Пелепейченко В.И. Модификация метода крупных частиц для расчета трехмерного нестационарного движения заряда в цилиндре ДВС.- Харьк.гос. академия ж.-д. транспорта.- Харьков, 1994.-13с. .-Деп. ГНТБ Украины, N 126-Ук 95, 16.01.95.

4. Пелепейченко В.И. Идентификация модели турбулентного движения воздушного заряда в камере сгорания дизеля.- Харьк. гос. академия ж.-д. транспорта.-Харьков, 1994.-13с.-Деп. ГНТБ Украины, N 129-Ук 95, 16.01.95.

5. Пелепейченко В.И., Назаренко Д.А., Крушедольский А.Г. Метод экспериментального определения основных параметров газового потока в коллекторах ДВС. // Совершенствование сельскохозяйственных тракторов и автомобилей: Сб. научных трудов. МИИСП, -т XV, Вып.4.-М. 1978.-с.69...74.

6. Каминский В.Н., Мамин В.В., Пелепейченко В.И. Выбор системы газотурбинного наддува для дивеля КамАЗ-740.//Тезисы

докладов Всесоюзной научно-техн. конф. "Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом".- Харьков, 1979. - с.191-192.

7. Симсон А.Э., Сахаревич В.Д., Пелепейченко В.И., Петросянц В.А. Оптимизация конструктивных параметров дизеля и турбокомпрессора. //Тезисы докладов Всесоюзной научно-техн. конф. "Актуальные проблемы развития двигателей внутреннего сгорания".- Л.: Судостроение, 1990.-с.16-17.

8. Крушедольский А.Г., Пелепейченко В.И., Симсон А.Э., Шаройко Н.А. Математическое моделирование рабочего цикла развернутого дизеля 10Д100 при его работе в эксплуатации.- Харьк. институт инж. ж.-д. транспорта.- Харьков, 1985.-10с. Деп. ДНИИТЭИТЯЖМАШ 26.03.1985. N 3020.

9. Пелепейченко В.И., Сахаревич В.Д. Математическая модель для расчета параметров нестационарного движения заряда в цилиндре в период наполнения-сжатия. "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье": //Тезисы докладов международной научно-техн. конф.- Харьков, 1993.-с.

10. Линник А.В., Курдюков А.П., Гапон В.В., Пелепейченко В.И. Четырехтактный дизель с газотурбинным наддувом. А.С. СССР N 1870274, зарегестр. 1.10.1987.

11. Пелепейченко В.И. Симсон А.Э., Леховицер М.А., Кравченко А.В., Гапон В.В. Двигатель внутреннего сгорания А.С. СССР N 1257262, зарегестр. 15.05.1986.

12. Симсон А.Э., Сахаревич В.Д., Пелепейченко В.И. Метод определения расходной характеристики турбины, работающей в импульсной системе наддува ДВС. //Вопросы теплообмена и гидродинамики транспортных и промышленных установок.-Вып.

634.-М.:МИИТ, 1979.- с.69-79.

13. Симсон А.Э., Счастный Е.Е., Лесовицкий И.В., Пеллепайченко В.И. Оценка путей реализации характеристики двигателя постоянной мощности дизеля 6ЧН12/14. Деп. ЦНИИТЭТЯЖМАШ, 4.09.89, N 445, ТМ-89.

14. Пеллепайченко В.И., Карнаухов Ю.И. Оценка резервов повышения экономичности дизеля 6ЧН13/11.5 путем выравнивания показателя газообмена цилиндров правого и левого рядов. Деп. ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 24.06, 1985, N 1491, ТМ-85.

15. Пеллепайченко В.И., Сахаревич В.Д. Показник для визначення рівномірності розподілу палива у камері згоряння.//Тези доповідей 55-ї наукової конференції спеціалістів залізничного транспорту.- Харків. інст. інж. залізничн. транспорту, 1993. -с. 17.

16. Курдюков А.П., Пеллепайченко В.И., Сахаревич В.Д., Таратушка В.А. Выбор системы ГТН перспективного дизеля 12ЧН14/14 для маневрового тепловоза.//Повышение топливной экономичности тепловозных дизелей и теплоэнергетических установок. Межвуз. сборник научн. трудов.- Харьков: ХИИТ, 1986.-с.51-63.

17. Сахаревич В.Д., Пеллепайченко В.И. Способ оценки равномерности распределения топлива в камере сгорания дизеля при расчетах смесеобразования. - Харьк. гос. академия ж.-д. транспорта.-Харьков, 1994.-8с. - Деп. в ГНТБ Украины. N 123 - Ук.95, 16.01.95.

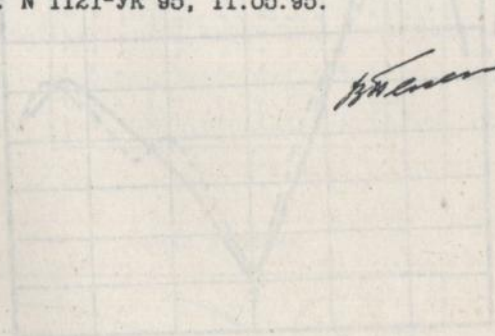
18. Алехин С.А., Пеллепайченко В.И. Определение коэффициента трения вращающегося воздушного заряда о стенки цилиндра двигателя внутреннего сгорания.- Харьк. гос. академия

ж.-д. транспорта.- Харьков, 1994, -13с. Деп. в ГНТБ Украины.  
N 124 - Ук 95, 16.01.95.

19. Алехин С.А., Пелепейченко В.И. Многофакторные зависимости для определения показателей газообмена цилиндра дизеля ДН12/2х12.- Харьк. гос. академия ж.-д. транспорта, Харьков, 1994.-12с. Деп. в ГНТБ Украины. N 128 - Ук 95, 16.01.95.

20. Алехин С.А., Пелепейченко В.И. Выбор параметров системы воздухообмена тепловозной модификации дизеля 6ДН12/2х12 из условия достижения заданных показателей газообмена. -Харьк. гос. академия ж.-д. транспорта.- Харьков, 1994. - 15с. - Деп. в ГНТБ Украины. N 125 - Ук 95, 16.01.95.

21. Пелепейченко В.И., Сахаревич В.Д. Расчетно- теоретический анализ состояния поля скоростей в смещенной относительно оси цилиндра камере сгорания дизеля.- Харьк. гос. академия ж.-д. транспорта. - Харьков,1994. - 8с. -Деп. в ГНТБ Украины. N 1121-Ук 95, 11.05.95.



*В.И. Пелепейченко*

Варианты соотношения между усредненной  
и пульсационной скоростями

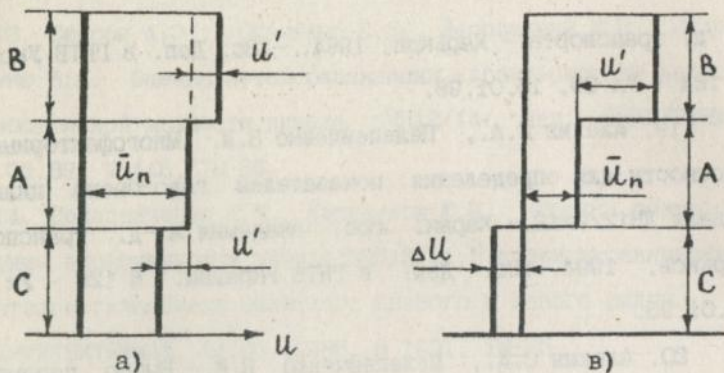


Рис.1

Компоненты вектора скорости в сечении  
форсуночного пояса дизеля ДН12/2х12



Рис.2

## Течение в смещенной камере сгорания

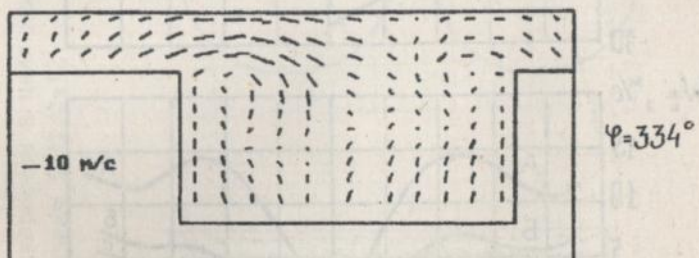
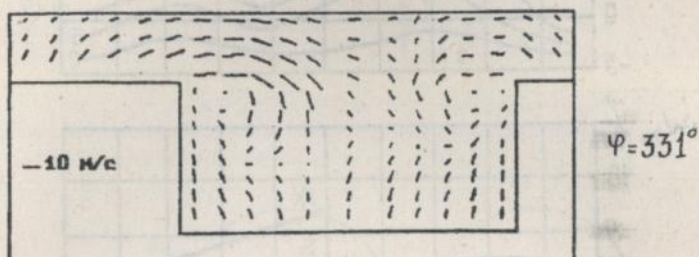
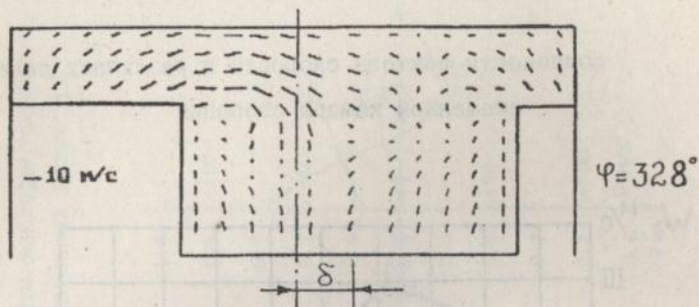


Схема течения



Рис. 3

Компоненты вектора скорости в различных сечениях  
смещенной камеры сгорания

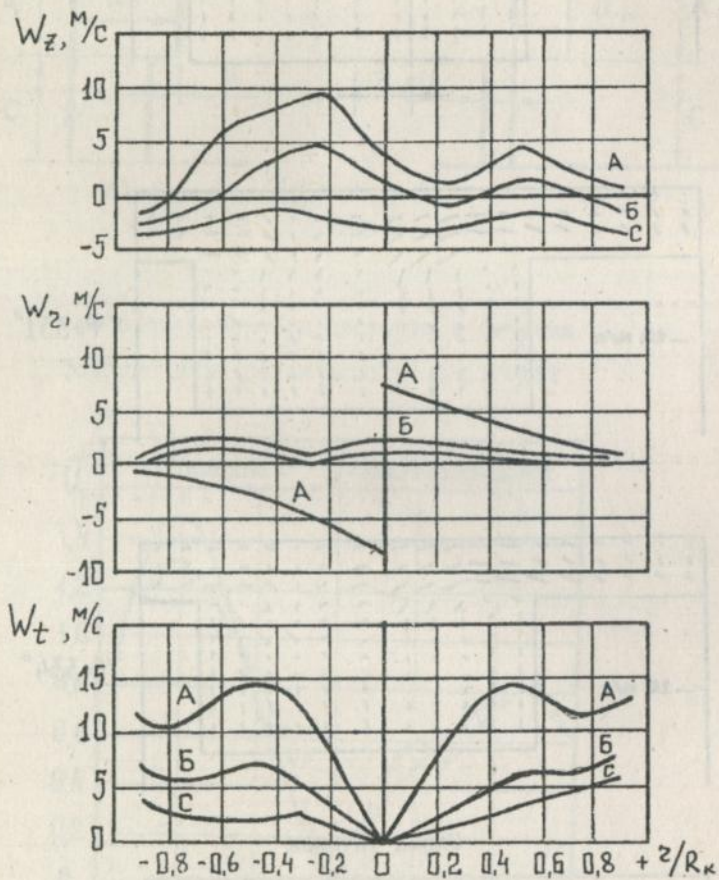


Рис. 4

Поле скоростей в цилиндре  
дизеля ДН12/2х12

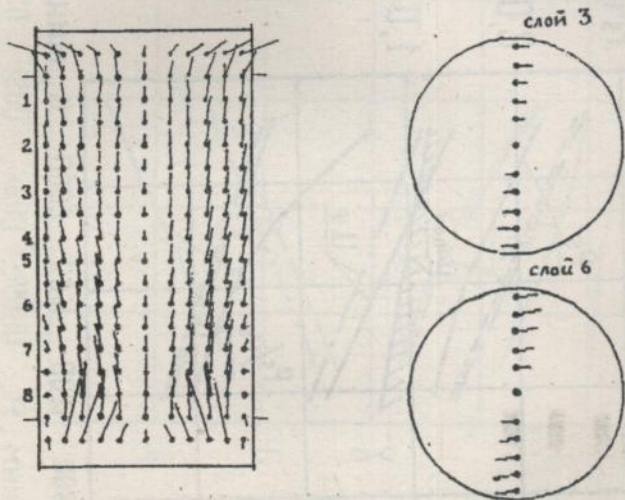


Рис.5

Компоненты векторов скорости,  
доля остаточных газов  $g$

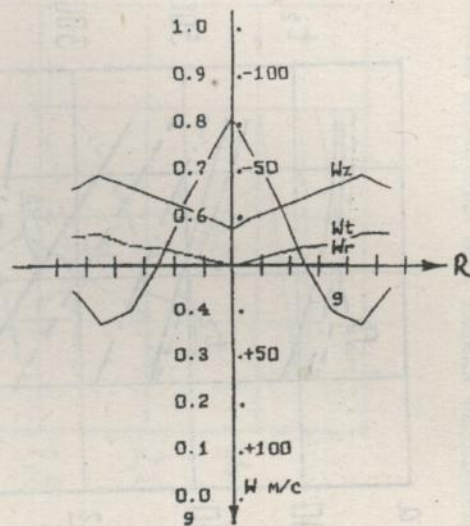


Рис.6

## Тепловозные характеристики дизеля 6ДН12/2х12

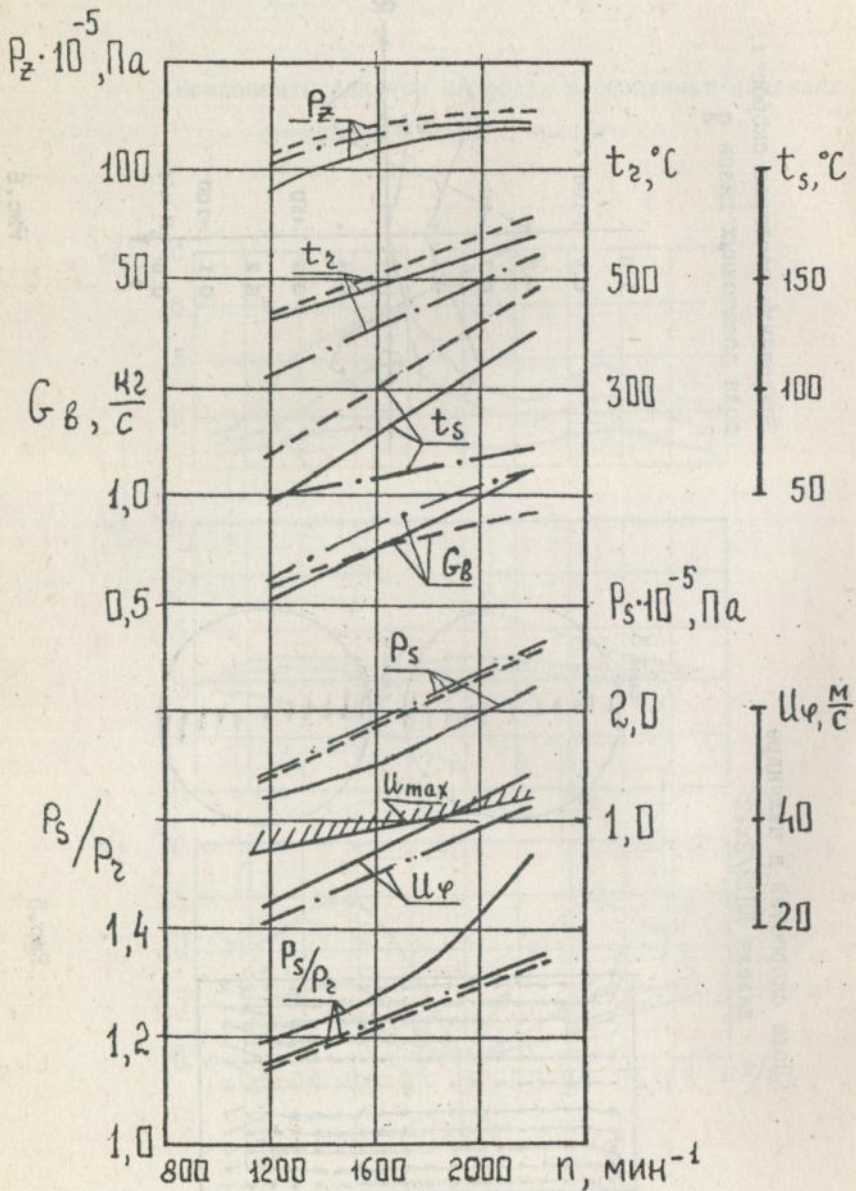


Рис. 7

## Тепловозные характеристики дизеля 6Д112/2х12

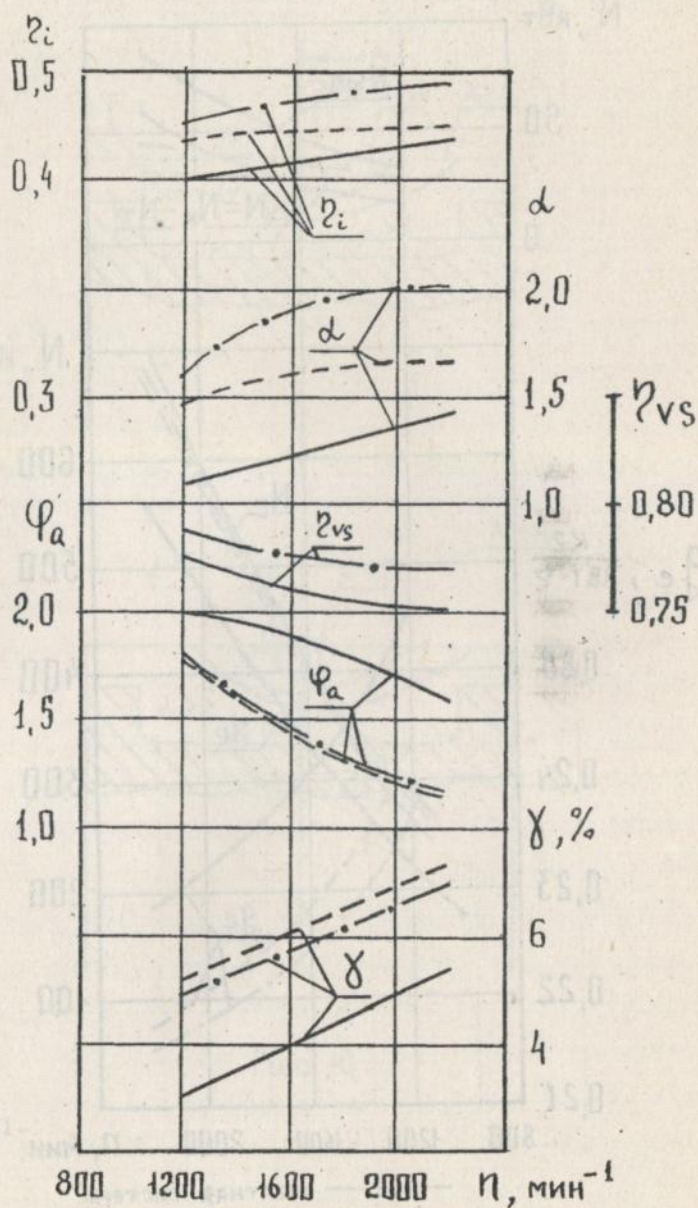


Рис. 8

## Тепловые характеристики дизеля 6ДН12/2х12

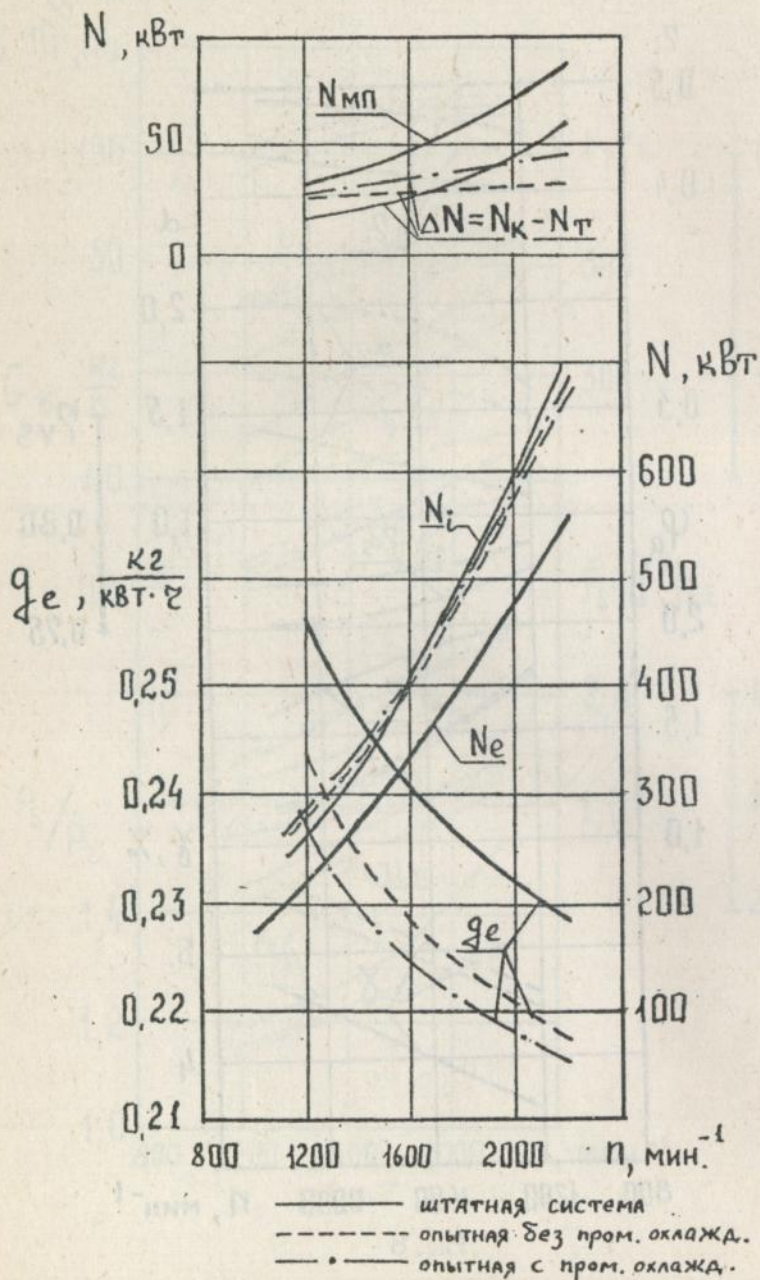


Рис. 9

Распределение газа в камере сгорания дизеля  
 Д50 в момент начала подачи запальной порции топлива  
 /  $\varphi = 336^\circ$ ,  $\xi = 0.66$  /

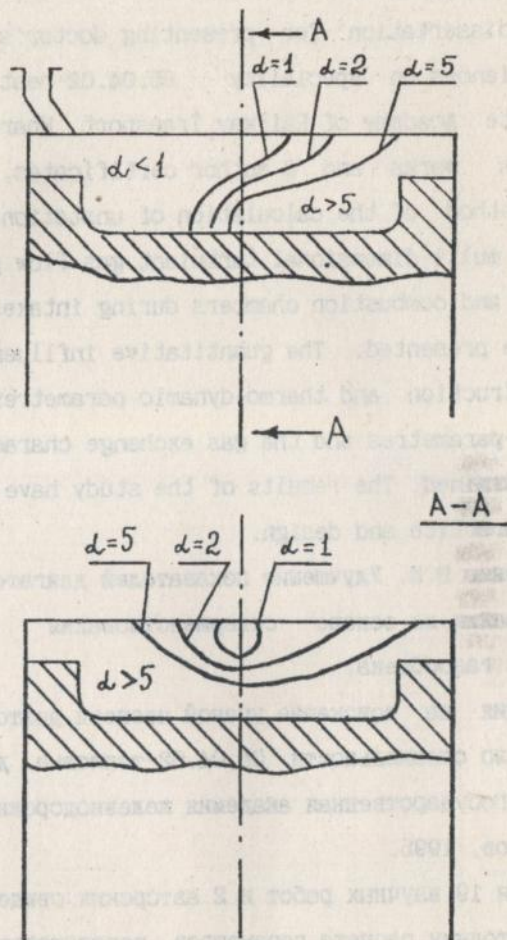


Рис. 10

Pelepeichenko V.I. Improving of the Indices of Internal Combustion Engines by means of Perfection of Local Gas Exchange Characteristics.

The dissertation for presenting doctor's degree of technical sciences on speciality 05.04.02-heat engines, Kharkov State Academy of Railway Transport, Kharkov, 1995.

19 research works and 2 author certificates, which include the method of the calculation of unstationary multi-composition multi-dimensional turbulent gas flow parametres in cylinders and combustion chambers during intake and compression, are presented. The quantitative influence of the engine construction and thermo-dynamic parametres upon the local flow parametres and the gas exchange characteristics has been determined. The results of the study have been used in research practice and design.

Пелепейченко В.И. Улучшение показателей двигателей внутреннего сгорания на основе совершенствования локальных характеристик газообмена.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.02-тепловые двигатели, Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 1995.

Защищается 19 научных работ и 2 авторских свидетельства, содержащих методику расчета параметров нестационарного турбулентного многокомпонентного газового потока в цилиндрах ДВС в периоды газообмена-сжатия. Установлено количественное влияние конструктивных и режимных параметров двигателя на локальные параметры потока, характеристики газообмена.

Результаты исследования внедрены в практику НИР и ОКР.  
Ключові слова: газообмін, поля параметрів, економічність.





Ав 33.557

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ  
НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ГАЗООБМЕНА

ПЕЛЕПЕИЧЕНКО Владимир Игоревич

Ответственный за выпуск  
к. т. н., доцент Крушедольский А. Г.

---

Подписано к печати 13.11.1995 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов

Печать офсетная. Усл. печ. листов 2, уч.-изд. лист.

Заказ 284 Тираж 100 экз. Бесплатно.

---

Издание ХГАЖТ, 310050, г. Харьков-50, пл. Феиербаха, 7

Тип. ХГАЖТ, 310050, г. Харьков-50, пл. Феиербаха, 7

44722

4833545  
**AB 33.545**

INSTITUTIONAL RESEARCH CENTER  
RESEARCH CENTER

RESEARCH CENTER  
RESEARCH CENTER  
RESEARCH CENTER

RESEARCH CENTER

RESEARCH CENTER  
RESEARCH CENTER

RESEARCH CENTER  
RESEARCH CENTER  
RESEARCH CENTER  
RESEARCH CENTER  
RESEARCH CENTER

RESEARCH CENTER  
RESEARCH CENTER