

ХАРЬКОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

МОРОЗОВ Юрий Валентинович

РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА  
ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНО-РЕГУЛИРОВОЧНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ

05.04.02 - Тепловые двигатели

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Харьков - 1995

ДВ 33.860

Диссертация является рукописью

Работа выполнена на кафедре "Автомобили, автомобильное хозяйство и ТКМ" в Украинском институте инженеров водного хозяйства.

Научные консультанты :

доктор технических наук, профессор Грунауэр А. А.  
доктор технических наук, профессор Розенлит Г. Б.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Долганов К. Е. ,  
доктор технических наук, профессор Мац Э. Э. ,  
доктор технических наук, профессор Молдавский А. А.

Учредительская организация - ХКБД при ГП "Завод им В. А. Малышева.

Защита состоится "25" сентября 1996 г. в ауд 313.813.00  
на заседании специализированного совета Д 02.15.02 по тепло-  
вым двигателям при Харьковской государственной академии же-  
лезнодорожного транспорта по адресу:

310050, г Харьков - 50, площадь Фейербаха, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харь-  
ковской государственной академии железнодорожного транспор-  
та по адресу:

310050, г Харьков - 50, площадь Фейербаха, 7.

Автореферат разослан "14" декабря 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

Ляльк В. М.

ЛННБ України ім. В. Стефаніка  
00754817 (W)



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ, АКТУАЛЬНОСТИ И  
СТЕПЕНИ ИССЛЕДОВАННОСТИ ТЕМАТИКИ ДИССЕРТАЦИИ.

Дизели - важнейшая составляющая часть энергетического комплекса. Актуальна задача улучшения их топливной экономичности. Топливная аппаратура (ТА) относится к наиболее ответственным агрегатам дизеля. Поэтому разработка, проектирование новых и совершенствование существующих ТА с целью улучшения экономичности дизелей является актуальной задачей.

Известно, что основное влияние на экономичность рабочего процесса двигателя оказывает закон подачи топлива. Для реализации заданных характеристик впрыскивания недостаточно наличия методов расчета процессов топливopодачи. Для этого должен быть применен обратный метод расчета - от конечных показателей к определению конструктивно-регулирующих и режимных параметров. Существующие методы не обладают универсальностью и могут быть использованы лишь для решения узкого круга задач.

Необходима разработка метода определения конструктивно-регулирующих параметров топливной аппаратуры дизеля, отличающегося многофакторностью, универсальностью при решении различных задач и реализованного в расчетном программном комплексе для ЭВМ.

С учетом этого в представленной к защите диссертации разработан метод определения конструктивно-регулирующих параметров ТА по заданным характеристикам впрыскивания, разработан программный комплекс для реализации этих теоретических положений, что при общей характеристике диссертационной работы позволяет ее квалифицировать как актуальную, направленную на решение крупной научно-технической проблемы, которая имеет важное прикладное значение.

ЛНБ ім. В. Стефаніва  
АН України

## ЦЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Разработка метода определения конструктивно-регулирующих параметров топливной аппаратуры дизеля по заданным характеристикам впрыскивания. Для ее достижения, определены следующие основные задачи:

1. Разработка схемы решения многофакторной оптимизационной задачи с использованием современных методов расчета процессов топливоподачи и планирования многопараметровых экспериментов.

2. Обоснование и разработка программного комплекса для ЭВМ, обеспечивающего оптимизацию конструктивно-регулирующих параметров ТА.

3. Проведение расчетных исследований по реализации заданных характеристик впрыскивания на конкретных конструкциях ТА.

4. Выработка рекомендаций по применению программных комплексов для разработки новых и модернизации существующих конструкций ТА.

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

Теоретическая ценность диссертационной работы определяется новыми методиками и алгоритмами расчетного исследования, позволяющими оптимизировать конструктивные параметры топливной аппаратуры по заданному закону впрыскивания. При этом практическая ценность диссертационной работы определяется программами для ЭВМ, которые реализуют проведение гидродинамического (ГД) расчета по предложенному плану эксперимента, обрабатывают результаты ГД расчетов для получения уравнений множественной нормализованной линейной регрессии (УМНР), оптимизируют конструктивно-регулирующие параметры

ТА для получения заданных ее показателей, а также определяется результатами расчетных исследований ТА ряда дизелей.

В работе:

1. Установлено, что для описания характера взаимосвязи между показателями впрыскивания топлива и конструктивными, регулировочными и режимными параметрами возможно применение уравнений линейной нормализованной множественной корреляции. При этом снимается ограничение на количество рассматриваемых параметров.

2. Разработаны схемы решения обратной задачи - определения рациональных значений конструктивных и регулировочных параметров по заданным интегральным и дифференциальным характеристикам процесса подачи топлива.

3. Показана возможность объективной комплексной оценки влияния отдельных конструктивно-регулируемых параметров топливной аппаратуры на показатели впрыскивания топлива путем определения процентной доли вклада каждого параметра в уравнение регрессии для конкретного показателя в определенных интервалах варьирования значениями параметров.

4. В качестве оптимального принималось решение, обеспечивающее минимальную сумму невязок между фактическим и заданным законом подачи.

5. Представлены результаты расчетных исследований топливной аппаратуры ряда дизелей, которые показали, что:

5.1. Для адекватного описания многомерного пространства показателей и параметров в уравнении регрессии обобщенный коэффициент корреляции уравнения должен составлять не менее 0,80...0,85.

5.2. Точность аппроксимации в уравнениях регрессии относительно исходной информации (результаты гидродинами-

ческих расчетов) изменяется в зависимости от значения обобщенного коэффициента корреляции в пределах 5...10 %.

6. Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований, которые позволили:

6.1. Обосновать возможность реализации с достаточной точностью требуемых характеристик впрыскивания в ТА тракторных дизелей при оптимальном профилировании кулачкового вала.

6.2. Уменьшить продолжительность впрыскивания в топливной аппаратуре тепловозного дизеля ПДГМ с 53 до 33° поворота коленвала при необходимом уровне давления впрыскивания топлива.

6.3. Показать, что при адаптации ТА дизеля ПДГМ к режиму газодизеля возможно обеспечение стабильной подачи запальной порции топлива в объеме 5 % от номинального значения.

Научную новизну исследования составляют:

1. Метод и алгоритм решения задачи оптимизации конструктивных параметров топливной аппаратуры по заданным законам впрыскивания топлива с ограничениями на продолжительность впрыскивания, цикловую подачу, максимальное давление впрыскивания, остаточное давление, максимальные контактные напряжения и др.

2. Метод обобщения взаимосвязи между параметрами и показателями топливной аппаратуры дизеля с использованием уравнений нормализованной линейной множественной регрессии (УНЛМР) для решения задачи синтеза топливной аппаратуры.

3. Метод выбора точек для расчетного эксперимента из многомерного гиперкуба пространства параметров топливной аппаратуры с одновременным изменением уровней всех параметров

без повторений.

4. Программный комплекс, включающий гидродинамические расчеты процесса впрыскивания, обработку их результатов для получения уравнений регрессии и оптимизацию конструктивно-регулирующих параметров.

#### УРОВЕНЬ РЕАЛИЗАЦИИ, ВНЕДРЕНИЯ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК

Диссертация выполнена в соответствии с планами Украинского института инженеров водного хозяйства, где работает соискатель.

Реализация научных разработок осуществлена путем расчетных исследований топливной аппаратуры ряда дизелей:

1. Топливная аппаратура дизеля ЧН13/14 НИКТИД (г. Владимир) по заданию ЦНИТА.

2. Опытная микропроцессорная топливная аппаратура для тракторного дизеля.

3. Топливная аппаратура дизеля 6ЧН-31,8/33 с целью улучшения ее основных показателей для повышения топливной экономичности.

Результаты научных исследований были переданы ЦНИТА в 1988...1990 годах для использования и внедрения.

Результаты исследований в виде программных комплексов для персонального компьютера приняты в 1995 году к использованию и внедрению в научно-техническом предприятии "Конструкторское бюро среднеоборотных двигателей" при ИП "Завод им. В. А. Малышева". Они используются также в учебном процессе для студентов специальности "Автомобили и автомобильное хозяйство" при чтении курса "Автомобильные двигатели" в Украинском институте инженеров водного хозяйства.

Внедрение теоретических и практических разработок подтверждено актами внедрения.

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

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: третья тематическая научная конференция по вопросам конструирования и эксплуатации топливopодaющих систем автотракторных дизелей (Саратов, СИМСХ, 1977 г.); ежегодные научно-исследовательские конференции МАДИ (1988, 1990 гг.); научно-технические конференции УИИВХ (1986, 1989, 1992, 1995); всесоюзный научно-технический семинар "Диагностика, повышение эффективности, экономичности и долговечности двигателей" (Ленинград-Пушкин, 1986, 1987 и 1990 гг.).

Публикации. По результатам исследований, вошедших в диссертацию, опубликовано 17 работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных литературных источников и 3 приложений. Работа содержит 284 стр. основного текста, 40 таблиц и 49 рисунков.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД В РАЗРАБОТКУ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ,  
ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ

В ходе выполнения диссертационной работы автором получены новые теоретические и практические результаты, которые и выносятся на защиту.

1. Разработаны основные положения по применению нормализованной множественной корреляции для установления комплексной взаимосвязи между показателями впрыскивания и конструктивно-регулируемыми параметрами топливной аппаратуры, по использованию УМНПР, описывающих показатели впрыскивания топлива.

2. Предложены схемы реализации заданных характеристик

впрыскивания топлива: путем решения системы линейных уравнений относительно показателей; с оптимизацией параметров градиентно-статистическим методом, в том числе с выбором профиля кулачкового вала и с последовательным рассмотрением двух показателей.

3. Разработаны алгоритмы и программы для программных комплексов, включающих: гидродинамические расчеты процесса впрыскивания топлива в дизеле, обработку их результатов для получения уравнений регрессии и оптимизации конструктивно-регулируемых параметров.

4. Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований с помощью программных комплексов на ЭВМ, которые позволили:

4.1. Обосновать возможность реализации с достаточной точностью требуемых характеристик впрыскивания в ТА авто-тракторных дизелей при оптимальном профилировании кулачкового вала.

4.2. Уменьшить продолжительность впрыскивания в топливной аппаратуре тепловозного дизеля ПДГ1М с 53 до 33° поворота коленвала при необходимом уровне давления впрыскивания топлива.

4.3. Показать, что при адаптации ТА дизеля ПДГ1М к режиму газодизеля возможно обеспечение стабильной подачи запальной порции топлива в объеме 5 % от номинального значения.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОЛОГИИ, МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРЕДМЕТА И ОБЪЕКТА

Применяемая в диссертационной работе совокупность средств, методов и приемов базируется на принципах системности. Предусматривается комплексный подход к проблеме ана-

лиза влияния конструктивно-регулирующих параметров на показатели впрыскивания; расчетно-экспериментальный метод научного исследования; разработка новых научных положений, которые позволяют в сочетании с известными рационально обеспечить решение цели и задач диссертации.

Новые методики реализации заданных характеристик впрыскивания предусматривают использование математических моделей, их идентификация с реальными процессами, зафиксированными экспериментально, использование математической статистики и теории вероятностей, обеспечивает возможность научных обобщений, выработку практических рекомендаций.

Объектом научного исследования является разделенная ТА дизеля с топливным насосом высокого давления рядного типа.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ, ВЫТЕКАЮЩИЕ ИЗ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Текст рукописи диссертационной работы содержит основные результаты диссертационного исследования. При этом во введении обоснована тема диссертационной работы, дана общая ее характеристика, сформулирована цель и задачи исследования, приведены положения, которые выносятся на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы определения параметров топливоподающей аппаратуры по заданным ее конечным показателям.

Транспортные дизели должны осуществлять экономичную работу в широком диапазоне изменения частоты вращения и мощности. При разработке перспективных дизелей к ТА предъявляется ряд требований. Это - необходимость увеличения ее производительности, улучшения качества распыливания топлива, увеличения надежности топливных насосов высокого давления (ТНВД) и форсунок, выбора оптимальных характеристик

ВТ и т. п.

Метод расчета показателей ВТ в дизеле известен как "прямой" метод расчета. В нем по известным значениям конструктивно-регулирующих параметров определяются значения показателей ВТ. Для подбора ТА по заданным параметрам топливоподачи (ТП) существуют "обратные" методы расчета. Идея обратного метода расчета была предложена И. В. Астаховым и В. С. Любинецким. По заданной характеристике ВТ, задавшись предварительно конструктивными особенностями форсунки на каждом этапе расчета, последовательно определяется давление распыливания, путь и скорость движения иглы, давление и волны давления у форсунки, скорость топлива в выходном сечении трубопровода. "Обратный" метод позволяет по заданным показателям ТП определить необходимые параметры ТА.

Имеющиеся алгоритмы расчета ТА имеют ограниченную применимость для решения обратной задачи поиска конструктивных соотношений по заданным характеристикам ВТ. Уточнение систем дифференциальных уравнений, описывающих процесс ТП, вызвало необходимость применения ЭВМ при расчетах. Математическое описание процесса ТП затрудняет обратное преобразование по методу конечных разностей в явном виде относительно параметров ТА. Для решения "обратной" задачи топливоподачи с помощью ЭВМ применение этого метода недостаточно эффективно.

В качестве объекта проектирования принята ТА разделенного типа с рядным ТНВД и бесштифтовой форсункой. Применяемая математическая модель для такой аппаратуры должна давать результаты, легко сопоставимые с результатами экспериментальных исследований рассматриваемых объектов, достаточно устойчивые при небольших изменениях входных

параметров. Приемлимыми являются математические модели, основанные на ГД методе расчета.

Необходим метод конструирования ТА, допускающий обоснованный выбор ее основных конструктивно-регулирующих параметров, отличающийся относительной универсальностью при решении различных задач, реализованный в расчетном ПРК для использования в системах автоматизированного проектирования.

Во второй главе приведен анализ существующих способов получения значений показателей, характеризующих работу топливopодающей аппаратуры.

К показателям ТП отнесены цикловая подача топлива,  $q_{\text{ц}}$ , продолжительность ВТ  $\Delta t_{\text{впр}}$ , давление топлива под конусом иглы форсунки  $P_{\text{ф}}$  и т. д. Дифференциальный закон ВТ рассмотрен в виде совокупности девяти ординат, расположенных на правых границах участков, полученных делением общей продолжительности ВТ на десять частей.

К параметрам ТА отнесены скорость вращения кулачкового валика, площадь плунжера, объем полости плунжера и т. д. Имеется около 40 конструктивно-регулирующих параметров топливной аппаратуры.

Основное содержание "прямой" задачи ТА - определение значений показателей ТП по заданным, исходным значениям параметров. Переход от входных конструктивных, регулировочных и режимных параметров к выходным показателям ТА может быть осуществлен путем проведения экспериментальных исследований, организации расчетных экспериментов.

Расчетные исследования могут базироваться на различных методах: критериальных, статических, гидродинамических. На теории неустановившегося движения идеальной упругой жидкости основан метод И. В. Астахова, пригодный для расчета ТА, рабо-

тающих на маловязких топливах. Более точными является решения, предложенные Т. Ф. Кузнецовым, в которых вязкость топлива учитывается амплитудным множителем. Большой вклад в совершенствование этих методов внесен Ю. Я. Фоминим. В диссертационной работе для расчетных экспериментов применены два варианта ГД метода расчета - алгоритмы МАДИ и ЦНИТА.

Экспериментальное исследование ТА дизелей затруднено из-за высокой стоимости разработки технологии, изготовления, доводки и последующих испытаний опытных образцов. Большая часть работ по изучению влияния входных параметров на конечные показатели ВТ основана на результатах расчетных исследований. Представляет интерес учет комплексного влияния параметров на показатели ВТ, который можно обобщить и использовать для других ТА.

В ряде работ рассматриваются зависимости показателей ВТ от значений комплексов параметров, называемых критериями подобия. Количественные зависимости между критериями обычно устанавливаются на основании обработки опытных данных в виде степенных зависимостей. Подобные зависимости позволяют распространять полученные данные на целый класс ТА.

Планируемый эксперимент является расчетным. Его особенность в является наличие значительного количества исходных параметров, характеризующих ТА: Количество таких факторов может достигать 40. Это исключает полный факторный эксперимент, т. е. перебор всех возможных значений параметров.

Взаимосвязь между параметрами и показателями предполагается в виде УМНЛР. Это исключает способ учета эффектов взаимовлияния между параметрами с помощью классического дрессного факторного эксперимента. Метод обработки результатов расчетного эксперимента накладывает на способ выбора

значений исходных параметров существенное требование их случайности. Для ряда экспериментальных исследований такой случайный характер выбора параметров может обеспечиваться автоматически. При организации расчетного эксперимента его необходимо специально предусмотреть.

Предложено интервал изменения каждого параметра разделить на определенное количество уровней (равное количеству расчетов в эксперименте). Для увеличения эффекта случайности при выборе исходных параметров ТА весь объем расчетного эксперимента разделен на несколько серий. При переходе от серии к серии следует изменять случайным образом последовательность параметров. Распределение значений параметра по уровням может быть равномерным или неравномерным.

В третьей главе рассмотрен многофакторный корреляционный анализ как способ описания пространства параметров и показателей топливоподачи.

Для учета нелинейных корреляционных связей между исходными переменными и показателем используют уравнения множественной регрессии линейного вида

$$Y = a_0 + a_1 f_1(X_1) + a_2 f_2(X_2) + \dots + a_n f_n(X_n) \quad / 1 /$$

Характер функций  $f_j(X_j)$  зависит от вида взаимосвязи между параметрами и показателями. Субъективный подбор этих функций затрудняет алгоритмизацию при использовании уравнений регрессии для задач оптимизации.

В работе Алексеева Г.А. изложены основы линейной множественной нормализованной корреляции, которые позволяют оценивать вклад каждого рассматриваемого параметра  $X_1, X_2, \dots, X_j$  в УМНЛР между нормализованными переменными  $U_j(X_j)$ .

$$U_0(X_0) = A_{01} U_1(X_1) + A_{02} U_2(X_2) + \dots + A_{0n} U_n(X_n) \quad / 2 /$$

Нормализованные переменные представляют собой монотонные

криволинейные функции от исходных переменных  $U_j = U_j(X_j)$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, 1$ . (1 - число параметров).

Чем больше отличаются кривые связи  $U_j = U_j(X_j)$  от прямых линий, тем больше эффект выравнивания попарных корреляционных связей  $(X_j, X_k)$  в результате нормализации переменных. Для определения функций (кривых) распределения вероятностей исходные данные наблюдений или экспериментов должны представлять случайную выборку.

Предложенный Г. А. Алексеевым метод выравнивания и нормализации многофакторных корреляционных связей применен в диссертационной работе для получения УМНЛР. Он основывается на двух функциональных преобразованиях конкретных значений 1 исходных параметров  $X_1, X_2, \dots, X_1$  и рассматриваемого показателя  $X_0 = Y$ . Первое преобразование состоит в замене  $N$  конкретных значений каждого  $j$ -ого параметра или рассматриваемого показателя при  $j=0$  ( $X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jN}$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, 1$ ) эмпирическими вероятностями неперевышения  $P_{j1}, P_{j2}, \dots, P_{jN}$ ,  $j=0, 1, 2, \dots, 1$ .

$$P_{j1} = \frac{m(X_{j1}) - 0.25}{N_j + 0.5} \quad / 3 /$$

Здесь  $m(X_{j1})$  - порядковые номера значений  $j$ -ого параметра после расположения их в возрастающем порядке.

Производится замена эмпирических вероятностей неперевышения  $P_{j1}$  соответствующими им значениями обратной функции (квантилями) нормального нормированного интегрального распределения  $U_{j1} = F(P_{j1})$  ( $U_{j1}, U_{j2}, \dots, U_{jN}$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, 1$ ).

Оба преобразования графически представлены на рис. 1 в виде двух кривых: эмпирической кривой распределения  $P_j = P_j(X_j)$  исходной переменной  $X_j$  и нормальной кривой распределения  $P_j = \Phi(U_j)$  нормализованной переменной  $U_j$ , с общей вертикальной ординатой вероятности неперевышения  $P_j$ .

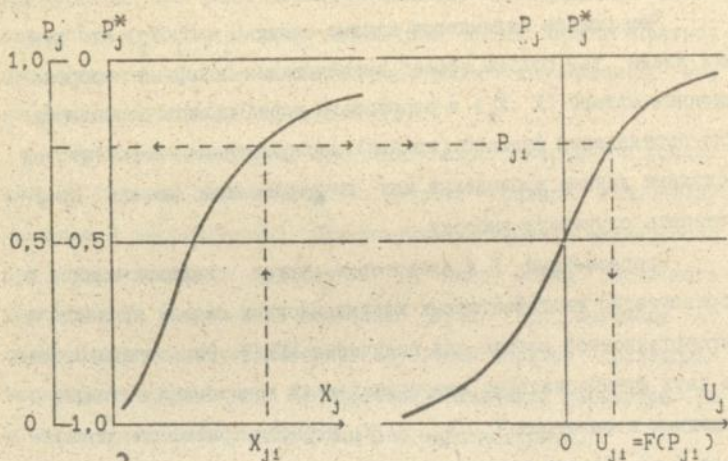


Рис. 1 Схема преобразования параметра или показателя  $X_J$  в ранговую  $P_J$  и нормализованную  $U_J$  переменные.

Для каждого ГД расчета, проведенного согласно плану эксперимента, получены значения показателей ВТ. В совокупности со значениями начальных параметров они представляют собой исходную информацию для обработки принятыми методами. Объем исходной информации оценивается суммарным числом параметров и показателей  $L$  и числом проведенных ГД расчетов  $N$ .

Обработка информации идет последовательно для каждого показателя. После получения коэффициентов УМНР показатель заменяется другим, и процесс циклически повторяется.

Для каждой пары исходных параметров определяется коэффициент нормализованной корреляции. Бычисленные коэффициенты нормализованной парной корреляции  $\gamma_{ik}$  определяют симметричную матрицу коэффициентов корреляции. Этой матрице из коэффициентов нормализованной парной корреляции соответствует система линейных нормальных уравнений:

Решая систему относительно  $\alpha_1$  определяем неизвестные

коэффициенты регрессии, входящие в УМНЛР. Полученное УМНЛР выражено относительно нормализованных переменных  $U_1$ .

Для УМНЛР определяется полный коэффициент корреляции:

$$R_0^2 = \gamma_{L_1} \alpha_1 + \gamma_{L_2} \alpha_2 + \dots + \gamma_{L_1} \alpha_1 + \dots + \gamma_{L_{L-1}} \alpha_{L-1} / 4 /$$

Он оценивает адекватность УМНЛР. Чем ближе к единице его значение, тем ближе к функциональной приближается корреляционная взаимосвязь между параметрами и показателями. УМНЛР можно использовать для качественной оценки показателей при  $R_0 > 0,6$  и для достаточно точной оценки - при  $R_0 > 0,8$ .

При анализе УМНЛР требуются доли вклада каждого параметра в конкретное уравнение. Чем выше значимость параметра, тем выше должна быть его доля вклада в УМНЛР. Предельным эффективным значением доли вклада является удвоенная относительная средняя квадратичная ошибка квадрата полного коэффициента корреляции.

Условием эффективности конкретного параметра является превышение его доли вклада над удвоенной относительной средней квадратичной ошибкой.

УМНЛР в левой части содержит нормализованный аналог показателя  $U_L$ , в правой части - нормализованные аналоги параметров  $U_1$ . В конкретных УМНЛР для нормализованных переменных применены обозначения, аналогичные обозначениям конкретных переменных, с добавлением сверху знака "тильда".

$$\tilde{X}_L = \alpha_1 \tilde{X}_1 + \alpha_2 \tilde{X}_2 + \dots + \alpha_1 \tilde{X}_1 + \dots + \alpha_{L-1} \tilde{X}_{L-1} / 5 /$$

Подобные линейные по форме уравнения, выраженные через нормализованные аналоги, могут быть использованы в различных целях: для выделения в явном виде параметров, входящих в правую часть; для составления и решения системы линейных уравнений; для проведения оптимизации градиентными методами; для решения задач линейного программирования. При практиче-

ском использовании УМНР необходимо осуществлять переход от вероятностных нормализованных аналогов к конкретным переменным и наоборот. Проще всего осуществить это графически по линии связи между конкретным параметром (или показателем) и его аналогом. Однако точность графического перехода не всегда достаточна. Реализован алгоритм перехода между конкретными и аналоговыми переменными в виде подпрограммы для ЭВМ.

На качество аппроксимации УМНР влияют два фактора.

1. Случайный характер выбора точек из рассматриваемого многомерного пространства параметров, который обеспечивается применяемым планом расчетного эксперимента.
2. Монотонность взаимосвязей между исходными параметрами и показателями, которая характерна для большинства практических задач.

Четвертая глава посвящена применению уравнений регрессии для определения показателей топливоподачи по заданным параметрам.

С помощью методов теории подобия можно получить устойчивые зависимости между исходными параметрами и конечными показателями ТА. Характерным является наличие большого количества критериев подобия. Критериальные зависимости обычно представляют в степенном виде. Поэтому большое количество критериев подобия усложняет вид зависимостей.

Одним из направлений развития критериальных методов является уменьшение их количества в степенных зависимостях путем укрупнения. Исследовалась возможность объективного уменьшения количества критериев подобия путем замены двух исходных критериев произведением их степеней. Такая постановка вопроса возможна и в некоторых случаях эффективна.

Уменьшение количества критериев указанным способом приводит к усложнению формы самих критериев. При практи-

ческом использовании зависимостей может возникнуть дополнительная задача - при заданных значениях безразмерных комплексов реализовать их в исходных параметрах.

Для использования критериев подобия в задаче синтеза ТА необходимы: простая форма записи критериев подобия для облегчения перехода от безразмерных критериев к исходным параметрам системы; минимальное число определяющих критериев подобия для упрощения критериальных зависимостей; простая форма критериальных зависимостей, обеспечивающая представление в явном виде каждого из факторов, входящих в нее. Самой простой формой зависимостей между критериями, удовлетворяющей третьему требованию, является линейная форма.

В таблице 1 приведены эффективные определяющие критерии численного примера 4.1 и интервалы их возможных изменений. В качестве основных единиц измерения приняты: длина  $h_0 = 1$  см, угол  $\varphi_0 = \Delta\varphi = 1$  рад, давление  $P_0 = 1$  МПа, скорость  $C_0 = 1$  см/с. Численные значения критериев и соответствующих изменяемых параметров в данном случае совпадают.

Таблица 1.

Критерии подобия, используемые в уравнении регрессии, изменяемые параметры и доли вклада критериев.

Критерий подобия	Изменяемый параметр критерия	Пределы изменения параметра	Доля вклада в уравнение регрессии
$\frac{\Gamma_{\Pi}}{h_0^2}$	площадь плунжера $\Gamma_{\Pi}$ , см <sup>2</sup>	0,436 ... 0,836	30,5 %
$\frac{\varphi_{Г.к.П}}{\varphi_0}$	угол геометрического конца подачи $\varphi_{Г.к.П}$ , рад	0,51 ... 0,65	30,5 %
$\frac{\omega h_0}{\Delta\varphi C_0}$	угловая скорость кулачкового вала $\omega$ , рад/с	47,2 ... 172,2	17,6 %
$\frac{\delta_k}{P_0 h_0}$	жесткость пружины нагнетательного клапана $\delta_k$ , рад/с	0,14 ... 1,54	4,7 %

$\frac{\Delta_{и}}{h_0}$	радиальный зазор в распылителе $\Delta_{и}$ , мкм	$3,5$	5,8 %
$\frac{10 M_k}{P_0 h_0 C_0^2}$	масса нагнетательного клапана $M_k$ , г	$0,35$ $12,35$	4,6 %
$\frac{f_T}{h_0^2}$	площадь канала в нагнетательном топливопроводе $f_T$ , см <sup>2</sup>	$0,0138$ $0,0538$	3,0 %
$\frac{l_T}{h_0}$	длина топливопровода $l_T$ , см	$32 \dots 92$	3,3 %
$\frac{q_{ц}}{h_0^3}$	цикловая подача $q_{ц}$ , мм <sup>3</sup> /цикл	$10,5 \dots 280$	-

В численном примере 4.1 рассмотрено комплексное влияние параметров, входящих в 26 определяющих критериев подобия, на цикловую подачу  $q_{ц}$ , характеризующую процесс ТП в целом. Для упрощения не исследовалось влияние скорости плунжера в характерных точках по углу поворота кулачкового вала и принят характер движения плунжера ТНВД дизеля Д-236.

После обработки результатов расчетов получено УМНЛР для неопределяющего критерия  $K^H = q_{ц} / h_0^3$ . Анализ долей вклада показал, что из 26 переменных эффективны лишь 8. В УМНЛР входят нормализованные аналоги параметров и показателей, обозначаемые знаком тильда ( $\sim$ ):

$$\tilde{q}_{ц} = 0,458 \tilde{f}_{п} + 0,415 \tilde{\varphi}_{г.к.п} + 0,236 \tilde{\omega} + 0,125 + 0,110 \tilde{\Delta}_{и} - 0,106 \tilde{M}_k - 0,075 \tilde{f}_T + 0,050 \tilde{l}_T, \quad / 6 /$$

где  $\tilde{q}_{ц}$ ,  $\tilde{f}_{п}$ ,  $\tilde{\varphi}_{г.к.п}$ ,  $\tilde{\omega}$ ,  $\tilde{\delta}_k$ ,  $\tilde{\Delta}_{и}$ ,  $\tilde{M}_k$ ,  $\tilde{f}_T$  и  $\tilde{l}_T$  - нормализованные переменные, введенные вместо критериев подобия таблицы 1.

Так как остальные параметры в критериях равны единицам измерения, то  $q_{ц}$  численно равно  $q_{ц} / h_0^3$ ,  $f_{п} \rightarrow f_{п} / h_0^2$ ,  $\varphi_{г.к.п} \rightarrow \varphi_{г.к.п} / \varphi_0$  и т.д.

Применение критериев подобия усложняет использование УМНЛР. Целесообразно вместо критериев подобия в уравнениях регрессии непосредственно рассматривать показатели впрыски-

вания топливной аппаратуры и ее конструктивно-регулируемые параметры.

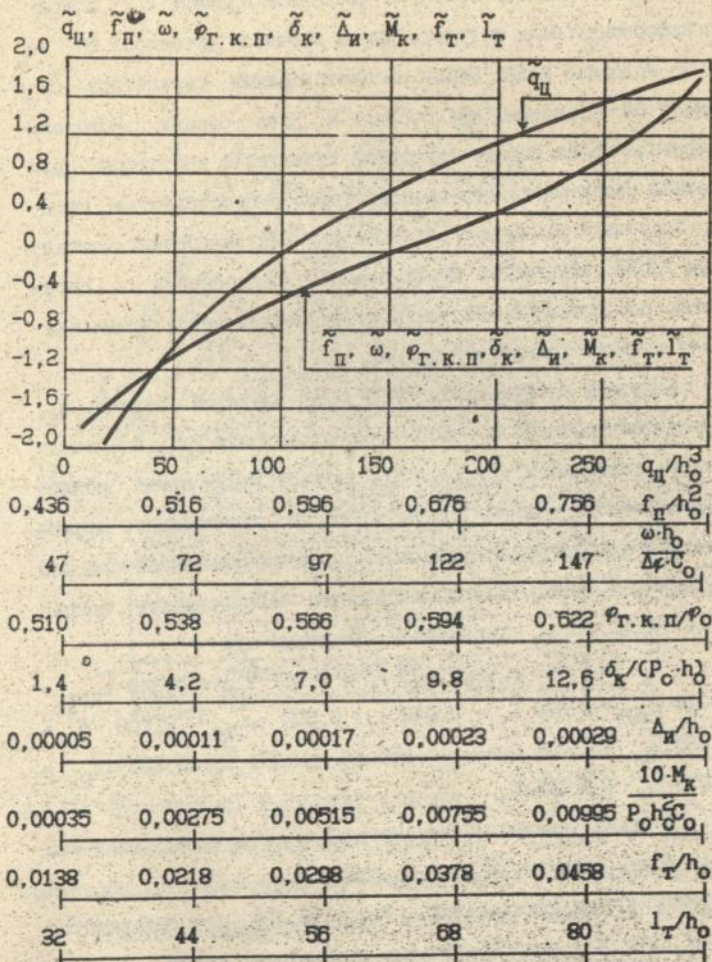


Рис. 2. Графики перехода от нормализованных переменных к критериям подобия.

Доля вклада параметра в уравнение регрессии зависит от набора рассматриваемых параметров, их интервалов их изменения.

и конкретного показателя ТА. В численном примере 4.2 исходная информация была получена путем расчетов процессов ВТ на ЭВМ по методике МАДИ. Число рассматриваемых параметров составило 34. Проведено 154 расчета в пяти сериях. Исходная информация носит вполне случайный характер и достаточна для описания рассматриваемого многофакторного пространства. Методика обработки расчетных результатов предусматривает составление УМНЛР, выраженных через аналоги показателей и параметров, построение графических зависимостей между этими аналогами и конкретными переменными.

Получены коэффициенты УМНЛР для цикловой подачи  $q_{ц}$ , продолжительности ВТ  $\Delta p$ , остаточного давления  $P_{ост}$  и максимального давления ВТ  $P'_{ф. max}$ . При анализе УМНЛР можно исключить параметры, доли вклада которых значительно меньше предельного эффективного значения, равного удвоенной средней квадратичной ошибке каждого параметра. Окончательное сокращенное УМНЛР для  $\tilde{q}_{ц}$  приобретает следующий вид

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{ц} = & 0,041 \tilde{n}_{кв} + 0,405 \tilde{f}_{п} + 0,017 \tilde{V}_{H0} + 0,249 \tilde{h}_{пmax} + \\ & + 0,049 \tilde{P}_{к0} + 0,040 \tilde{f}_{т} + 0,048 \tilde{i}_{т} + 0,502 \tilde{P}_{ГКП} - 0,108 \tilde{d}_{от} + \\ & + 0,035 \tilde{P}_{вс} - 0,066 \tilde{\cos\beta} - 0,154 \tilde{\Delta}_{ц} - 0,054 \tilde{f}_{к} - 0,206 \tilde{h}_{р} - \\ & + 0,053 \tilde{M}_{к} + 0,196 \tilde{f}_{и}. \end{aligned} \quad \nearrow / 7 /$$

К слабо влияющим параметрам в отношении цикловой подачи можно отнести  $V'_H$ ,  $u_{max}$ ,  $t_{ф}$ ,  $\mu_{кп}$ ,  $f'_к$ ,  $f'_и$ ,  $\Delta'_и$ . В отношении других показателей -  $P_{ост}$ ,  $\Delta p$ ,  $P'_{фmax}$  - получаются другие сочетания малоэффективных параметров. Анализ влияния параметров на конкретный показатель сводится к сортировке параметров по значению доли вклада параметра. Часть полученного списка можно исключить из дальнейшего рассмотрения. Последующая обработка оставшейся части информации приводит к получению нового набора долей вклада и коэффициентов УМНЛР.

Возможна оценка показателей ВТ по упрощенным УМНДР при использовании номографических методов.

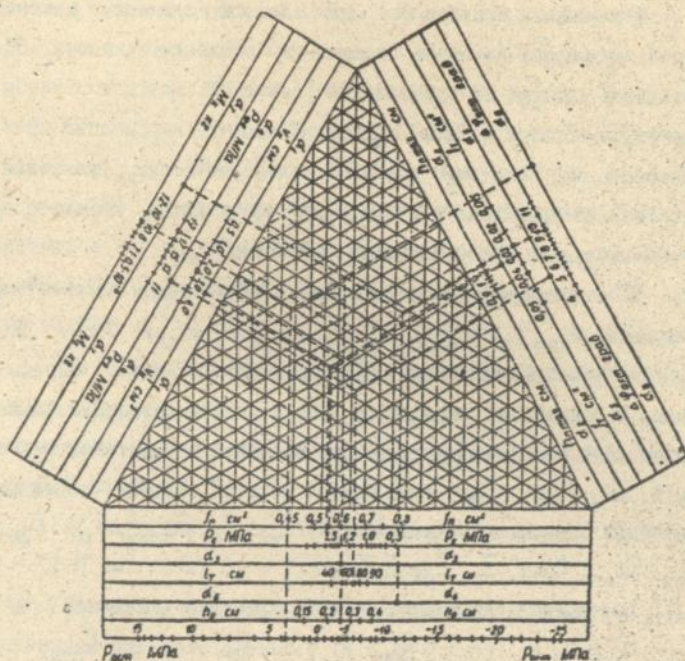


Рис. 3. Номограмма для вычисления остаточного давления  $P_{ост}$  в трубопроводе топливной системы.

На рис. 3 приведена номограмма для упрощенного УМНДР, позволяющая определить остаточное давление в топливопроводе.

В пятой главе рассмотрено применение уравнений регрессии для оценки и выбора параметров топливоподающих систем.

Предложены три возможные градиентные схемы оптимизации ВТ в дизелях: достижение максимума цикловой подачи  $Q_{ц}$  при наличии линейных двухсторонних ограничений ординат дифференциального закона подачи; достижение минимума целевой функции

в виде суммы модулей отклонений ординат дифференциального закона подачи при наличии жесткого ограничения цикловой подачи; поиск области допустимых решений.

В численном примере 5.1 для девяти ординат закона подачи, суммарной цикловой подачи и продолжительности ВТ составлена система из одиннадцати уравнений. Для того, чтобы простейшим образом решить "обратную" задачу, необходимо преобразовать эту систему линейных алгебраических уравнений относительно одиннадцати достаточно эффективных параметров со значительными коэффициентами регрессии.

На основании анализа отнесены к эффективным параметрам следующие:  $n_{кв}$ ,  $f_{п}$ ,  $h_{пmax}$ ,  $t_n$ ,  $P_{\phi 0}$ ,  $\varphi_{гкп}$ ,  $\mu_{кп}$ ,  $\cos\beta$ ,  $\Delta_p$ ,  $h_p$ ,  $f_{и}$ . Численные значения этих параметров подлежат определению. Остальные из параметров должны быть предварительно заданы. Для обеспечения требуемых значений показателей  $q_{ц}$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ , ...,  $Q_9$  необходимо решить систему линейных уравнений относительно неизвестных  $\tilde{n}_{кв}$ ,  $\tilde{f}_{п}$ ,  $\tilde{h}_{пmax}$ ,  $\tilde{t}_n$ ,  $\tilde{P}_{\phi 0}$ ,  $\tilde{\varphi}_{гкп}$ ,  $\tilde{\mu}_{кп}$ ,  $\tilde{\cos\beta}$ ,  $\tilde{\Delta}_p$ ,  $\tilde{h}_p$ ,  $\tilde{f}_{и}$ .

Составлены одиннадцать УМНЛР, подобные выражению /8/.

$$\tilde{q}_{ц} - C_q = 0 \cdot \tilde{n}_{кв} + 0,507 \cdot \tilde{f}_{п} + 0,287 \cdot \tilde{h}_{пmax} + 0 \cdot \tilde{t}_n + 0 \cdot \tilde{P}_{\phi 0} + 0,415 \cdot \tilde{\varphi}_{гкп} + 0,096 \cdot \tilde{\mu}_{кп} + 0,080 \cdot \tilde{\cos\beta} - 0,148 \cdot \tilde{\Delta}_p - 0,218 \cdot \tilde{h}_p + 0,090 \cdot \tilde{f}_{и} \quad / 8 /$$

При решении задачи синтеза в данной постановке величины, находящиеся в левой части уравнений, могут быть легко определены. При заданных показателях  $q_{ц}$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $Q_1 \dots Q_9$  по графическим зависимостям определяются их вероятностные аналоги. Величины  $C_q$ ,  $C_{\varphi}$ ,  $C_1$  и т.д. представляют собой алгебраические суммы произведений аналогов предварительно заданных параметров на соответствующие коэффициенты регрессии.

В результате решения системы уравнений типа /8/ бу-

дуг получены вероятностные аналоги искомых параметров ТА:

$$\tilde{n}_{\text{КВ}}, \tilde{f}_{\text{П}}, \tilde{h}_{\text{П}}, \tilde{h}_{\text{Пмакс}}, \tilde{t}_{\text{Н}}, \tilde{P}_{\text{Ф0}}, \tilde{\varphi}_{\text{ГКП}}, \tilde{\mu}_{\text{ГКП}}, \tilde{\cos\beta}, \tilde{\Delta}_{\text{П}}, \tilde{h}_{\text{Р}}, \tilde{f}_{\text{И}}.$$

По графическим зависимостям определены соответствующие значения вероятностных аналогов. Подставим значения  $Q_1$  и вероятностных аналогов заданных показателей  $\tilde{q}_{\text{Ц}}, \tilde{\Delta\varphi}, \tilde{Q}_1$  и т. д. в систему и решим ее. Решение системы  $\tilde{n}_{\text{КВ}} = -0,115$ ;  $\tilde{f}_{\text{П}} = -0,207$ ;  $\tilde{h}_{\text{Пмакс}} = -0,046$ ;  $\tilde{t}_{\text{Н}} = -0,302$ ;  $\tilde{P}_{\text{Ф0}} = 0,092$ ;  $\tilde{\varphi}_{\text{ГКП}} = 0,138$ ;  $\tilde{\mu}_{\text{ГКП}} = 0,501$ ;  $\tilde{\cos\beta} = 0,527$ ;  $\tilde{\Delta}_{\text{П}} = 0,207$ ;  $\tilde{h}_{\text{Р}} = 0,326$ ;  $\tilde{f}_{\text{И}} = 0,608$  соответствует конкретным значениям искомых параметров ТА:  $n_{\text{КВ}}=840$  об/мин;  $f_{\text{П}}=0,571$  см<sup>2</sup>;  $h_{\text{Пмакс}}=0,946$  см;  $t_{\text{Н}}=28,4$  с<sup>0</sup>;  $P_{\text{Ф0}}=15$  МПа;  $\varphi_{\text{ГКП}}=33,34^{\circ}$ ;  $\mu_{\text{ГКП}}=0,0277$  см<sup>2</sup>;  $\cos\beta=0,833$ ;  $\Delta_{\text{П}}=0,00094$  см;  $h_{\text{Р}}=0,3396$  см;  $f_{\text{И}}=0,3637$  см<sup>2</sup>.

При ГД расчете процесса ТП по описанной ранее методике с этими параметрами получены следующие значения конечных показателей:  $q_{\text{Ц}} = 93$  мм<sup>3</sup>/цикл;  $\Delta\varphi = 9,6^{\circ}$ ;  $Q_1 = 5,0$  мм<sup>3</sup>/град;  $Q_2 = 9,7$  мм<sup>3</sup>/град;  $Q_3 = 11,5$  мм<sup>3</sup>/град;  $Q_4 = 13,6$  мм<sup>3</sup>/град;  $Q_5 = 11,7$  мм<sup>3</sup>/град;  $Q_6 = 11,1$  мм<sup>3</sup>/град;  $Q_7 = 13,3$  мм<sup>3</sup>/град;  $Q_8 = 11,5$  мм<sup>3</sup>/град;  $Q_9 = 7,3$  мм<sup>3</sup>/град.

Отклонение полученных показателей от заранее заданных составляет соответственно: 7,0; 7,9; 2,0; 1,0; 4,2; 1,5; 0,9; 10,5; 3,9; 0,9; 1,4 %. Погрешности реализации заданных показателей определяются достоверностью используемых УМНЛР.

В численном примере 5.2 по заданным начальным параметрам и требуемым ординатам закона подачи можно определить значения параметров ТА, наиболее близко обеспечивающие эти ординаты дифференциального закона при стабильной цикловой подаче. Линейное относительно параметров уравнение для целевой функции может быть минимизировано известными методами. Статистическая информация для УМНЛР получена на основании ГД расчетов процессов ТП по алгоритму, разработанному в ЦНИА

Всего произведено 4 серии расчетов по 32 расчета в каждой.

В каждом ГД расчете со стабильной подачей  $Q_{\text{ц}}=100$  мм<sup>3</sup>/цикл рассмотрению подлежали ординаты закона подачи  $Q_1, Q_2, \dots, Q_9$  и продолжительность ВТ  $\Delta\varphi_{\text{впр}}$  в град. Целевая функция определялась как сумма модулей разностей расчетных значений ординат и заданных их значений  $\Delta Q_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^9 |Q_i - Q_{i3}|$ .

Осуществлялся подбор пяти вариантов ТА. Значения исходных параметров приняты одинаковыми, близкими к центрам соответствующих интервалов изменения. Для каждого из 128-ми расчетов определено значение целевой функции  $\Delta Q_{\text{sum}}$  и продолжительность ВТ  $\Delta\varphi_{\text{впр}}$ . Для этих двух показателей получены два УМНР относительно нормализованных аналогов рассматриваемых уравнений по каждому варианту.

Методика оптимизации предполагает минимизацию вероятностного аналога целевой функции и сохранение неизменным



Рис. 4. Заданная и полученная характеристики ВТ в виде последовательности ординат закона подачи для варианта # 5.

значения вероятностного аналога второго показателя - продолжительности ВТ. В результате проведения оптимизации определяется 32 значения исходных параметров в вероятностной форме для каждого из пяти вариантов. Производится переход от вероятностной к конкретной форме параметров. После определения значений параметров в конкретной форме произведены проверочные ГД расчеты с полученными значениями.

Средняя по пяти проведенным в качестве численного примера вариантам расчетов погрешность подбора ординат закона подачи составляет 16.21%. Чем ближе к центру интервалов приняты заранее заданные значения параметров и показателей, тем выше точность подбора значений целевой функции. Рекомендуется использовать 40... 50% в центральной части интервала.

Кроме градиентного метода для определения параметров ТА систем рассмотрены методы линейного программирования. Реализован так называемый "интуитивный" подход к задаче линейного программирования.

Предположим, что в качестве изменяемых величин принято 32 параметра ТА. А для каждого из десяти показателей ВТ составлено уравнение регрессии. Тогда  $i = 32$  и  $j=10$ . Если число уравнений равно числу переменных параметров ( $i=j$ ), то можно просто решить такую систему линейных уравнений, например, методом Гаусса. Полученное решение должно обеспечить заданных  $j$  значений показателей ВТ.

Равенство  $i = j$  не гарантирует успешной реализации произвольно заданного набора значений показателей ВТ (например, совокупность девяти ординат характеристики ВТ и остаточное давление в топливопроводе). Это возможно лишь при условии ограничения значений полученных аналогов параметров. Для информации из 128 расчетов это значение составляет 2,5.

Если  $|X_i| > 2.5$ , то невозможно осуществить точный переход от полученных аналогов к конкретным параметрам. Возможно при этом упрощения. Например, если  $|X_i| > 2.5$ , то принимаем  $|X_i| = 2.5$ . Если влияние конкретного параметра невелико, то замена допустима и не вносит значительных погрешностей.

Уменьшение модулей получаемых аналогов параметров обеспечивается при приближении заданных значений показателей к центрам их интервалов изменения. Вокруг комплекса значений показателей, определяющих центры интервалов их изменения существует зона гарантированной реализации произвольных наборов значений показателей.

Случай равенства  $i=j$  является частным. В общем случае  $i > j$ , и простое решение линейной системы уравнений неприемлемо. Необходимо исключить из рассмотрения  $i-j$  параметров (например, задать их значения постоянными). В конкретной реализованной программе проводился анализ значимости параметров, их доли вклада в УМНЛР: Сильновлияющие параметры имеет смысл включать в систему линейных уравнений для решения. Кроме того, некоторые параметры ТА должны принимать фиксированные значения (например, диаметр плунжера  $d_{II}$ ).

В результате анализа все параметры разделяются на три группы: фиксированные параметры, сильно влияющие изменяемые параметры и слабо влияющие изменяемые параметры. Во вторую группу в простейшем случае включаем  $j-1$  сильно влияющих параметров. Если число фиксированных параметров  $k$ , то количество слабо влияющих параметров будет  $i-k-j+1$ . Система линейных уравнений включает все сильно влияющие параметры и один из слабо влияющих. Решаем систему уравнений и анализируем полученное решение на предмет ограничения по модулю. По значениям параметров определяем значение целевой функции.

Второй вариант системы линейных уравнений будет получен путем замены первого слабо влияющего параметра на второй. После решения системы получено новое значение целевой функции. При переборе одного слабо влияющего параметра в итоге будет получено  $i-k-j+1$  значений целевой функции. То решение, которое удовлетворяет условию минимальности или максимальности будет искомым.

В шестой главе описана разработка программного обеспечения для комплексного решения задач оптимизации топливоподачи в дизелях.

Процесс уточнения алгоритмов ГД расчета привел к резкому увеличению продолжительности ГД расчетов. Один цикл ГД расчета по методике ЦНИТА на ЭВМ ЕС-1036 имел продолжительность около 5 мин. Если осуществлять подбор оптимального давления и угла геометрического конца подачи, то продолжительность расчета может составить в среднем 2...2.5 часа. На продолжительность расчета существенно влияет методика и алгоритм задачи. Если сравнить расчет аналогичного объекта по двум программам (ЦНИТА и МАДИ), то продолжительность счета окажется во втором случае в два раза меньше.

ГД расчет является наиболее продолжительной частью всех видов расчетов при оптимизации параметров ТА. Обработка результатов расчетов и непосредственно оптимизация занимают несравнимо меньше времени по сравнению с ГД расчетом.

Для персональных компьютеров, обозначаемых IBM PC-AT и совместимых с ними, имеется программное обеспечение, поддерживающее алгоритмический язык высокого уровня "Фортран-77". Быстродействие зависит от применяемого алгоритмического языка, от номера используемой версии программного обеспечения, от опций, примененных при компилировании и редактировании.

Хорошие показатели быстродействия имеет программное обеспечение "Микрософт-Фортран" с оптимизирующими по скорости опциями. Оно использовано для составления ПРК по оптимизации ТА дизелей. Применять его рекомендуется на персональных компьютерах IBM PC-AT с сопроцессором.

Решение задач расчета ТА дизелей включает в себя ГД расчет по определенному плану, обработку результатов расчетов с целью получения уравнений регрессии и непосредственно решение "обратной" задачи. Структура ПРК вполне соответствует последовательности этих этапов и включает в себя соответствующие части программы - подпрограммы.

Программа ГД расчета принята в качестве составной части разрабатываемого ПРК. Для решения задач оптимизации в ПРК принят к реализации градиентно-статистический метод. Для его осуществления предполагается наличие регрессионных линейных зависимостей между показателями (целевой функцией) и параметрами систем ТП. В состав разрабатываемой программы должна входить подпрограмма обработки результатов ГД расчетов с получением регрессионных зависимостей. Непосредственно оптимизация и получение параметров ТА осуществляется в оптимизационной программе.

ПРК выполнен как законченное программное изделие и может использоваться для оптимизации показателей ТП как автономно, так и в составе других программных комплексов. Внедрение подобных комплексов предполагается обеспечить путем применения на предприятиях, осуществляющих проектирование, разработку и производство ТА.

Проведено сравнение результатов расчетного подбора параметров опытного образца топливной системы и результатов его стендовых испытаний. В качестве объекта исследований

принята ТА, состоящая из ТВД рядного секционного типа и бесштифтовой форсунки. Эта аппаратура предназначена для установки на одноцилиндровом двигателе НИКТИД (г. Владимир) размерности ЧН-13/14.

Осциллографирование давления ВТ проводилось по методике НПО "ЦНИТА" на безмоторном стенде "Моторпал". При этом применена типовая измерительная и регистрирующая аппаратура. В результате испытаний получены осциллограммы давления ВТ. На рис. 5...8 приведены осциллограммы вариантов, выбранных для сравнения с расчетным методом оптимизации. По ним определены ординаты экспериментальных законов подачи.

На основании результатов экспериментальных исследований произведен выбор рациональной комплектации системы ТП. Принятые параметры экспериментальной ТА:  $d_{II} = 11$  мм;  $\mu_{сгс} = 0.23$  мм<sup>2</sup>;  $P_{\Phi 0} = 25$  МПа;  $d_T = 2$  мм;  $n_{KB} = 1000$  мин<sup>-1</sup>.

Полученные в результате стендовых испытаний показатели: 1.  $q_{II} = 100$  мм<sup>3</sup>;  $P_{\Phi 0} = 69$  МПа;  $\Delta\varphi_B = 7.6^\circ$ .

2.  $q_{II} = 150$  мм<sup>3</sup>;  $P_{\Phi 0} = 104$  МПа;  $\Delta\varphi_B = 9.8^\circ$ .

Для проведения численной оптимизации параметров рассматриваемой ТА выбраны изменяемые параметры ТА и назначены интервалы их изменения. (Численный пример 6.1). Статистическая информация для УМНР в данном случае получена на основании ГД расчетов процессов ВТ по алгоритму, разработанному в ЦНИТА. Всего произведено 8 серий расчетов по 18 расчетов в каждой. В первых четырех сериях расчетов осуществлен подбор цикловой подачи  $q_{II} = 100$  мм<sup>3</sup>, во вторых - подбор  $q_{II} = 150$  мм<sup>3</sup>.

В каждом ГД расчете со стабильной подачей  $q_{II} = 100$  или  $150$  мм<sup>3</sup>/цикл рассмотрению подлежали ординаты закона подачи  $Q_1, Q_2, \dots, Q_9$  и продолжительность ВТ  $\Delta\varphi_{Bпр}$  в град. Целевая

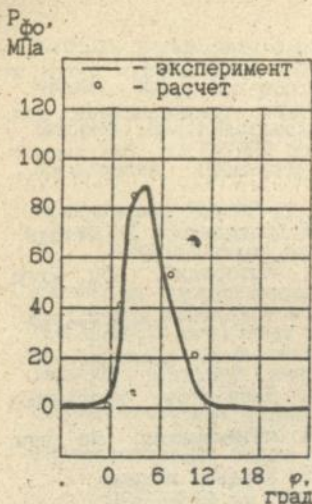


Рис. 5. Оциллограмма давления впрыскивания  $P'_{ф0}$  при  $\mu_c f_c = 0.185 \text{ мм}^2$  и  $q_{ц} = 100 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ .

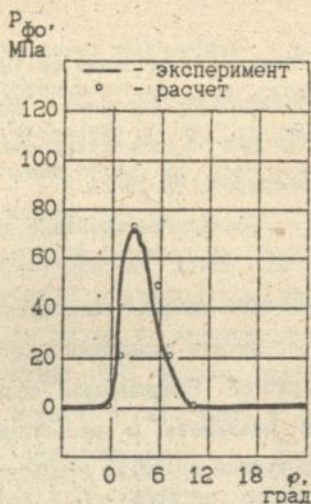


Рис. 6. Оциллограмма давления впрыскивания  $P'_{ф0}$  при  $\mu_c f_c = 0.230 \text{ мм}^2$  и  $q_{ц} = 100 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ .

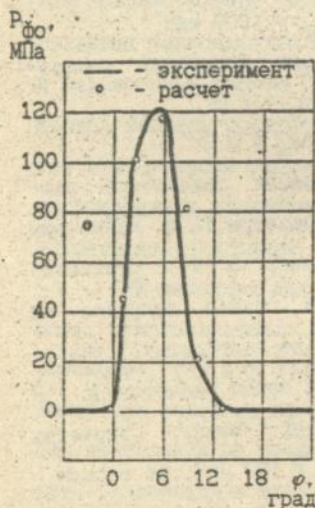


Рис. 7. Оциллограмма давления впрыскивания  $P'_{ф0}$  при  $\mu_c f_c = 0.185 \text{ мм}^2$  и  $q_{ц} = 150 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ .

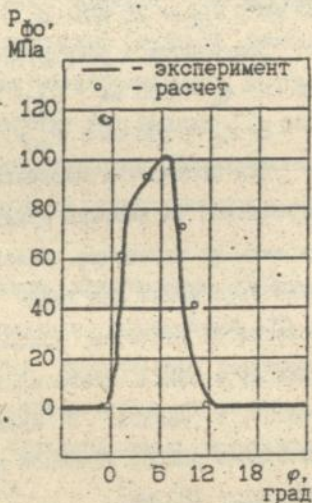


Рис. 8. Оциллограмма давления впрыскивания  $P'_{ф0}$  при  $\mu_c f_c = 0.230 \text{ мм}^2$  и  $q_{ц} = 150 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ .

функция - сумма модулей разностей полученных расчетом значений ординат и заданных их значений  $\Delta Q_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^9 |Q_i - Q_{i3}|$ .

Для сравнения с выводами по стендовым испытаниям осуществлялся подбор двух вариантов ТА для цикловой подачи  $q_{\text{ц}}=100 \text{ мм}^3$  и двух вариантов для  $q_{\text{ц}}=150 \text{ мм}^3$ . Значения исходных параметров приняты одинаковыми, близкими к центрам соответствующих интервалов изменения. Из осциллограмм, приведенных на Фиг. 5...8 получены ординаты графиков давления ВТ. Ординаты давления пересчитаны в ординаты закона подачи.

Для каждого из 72-ми расчетов определено значение целевой функции  $\Delta Q_{\text{sum}}$  и продолжительность ВТ  $\Delta \tau_{\text{впр}}$ . Для этих двух показателей получены два УМНЛР относительно нормализованных аналогов рассматриваемых уравнений по каждому варианту. В результате проведения оптимизации определено 18 значений параметров для четырех вариантов. Полученные значения параметров рассматриваемого типа ТА в основном соответствуют интервалам изменения, принятым для стендовых испытаний. Произведены ГД расчеты с полученными значениями. Среднее отклонение расчетных значений ординат от экспериментальных значений по четырем вариантам составляет 24%.

Предложено осуществлять подбор оптимального профиля кулачкового вала на этапе подготовки исходной информации для УМНЛР и совместить этот процесс с ГД расчетом ТА. Тогда предложенные ранее УМНЛР будут составлены для уже оптимизированных профилей кулачковых валов.

В ряде работ Грунауэра А.А. отмечается необходимость учета зависимости силы давления топлива от закона движения плунжера. Если такой учет отсутствует, то получаемый закон движения плунжера не будет оптимальным. Поэтому оптимизацию закона движения плунжера следует осуществлять при фиксиро-

ванных параметрах ТА. Оптимальный закон движения находится методом последовательных приближений при уточнении силы давления топлива. Такая методика представляет собой ГД расчет процесса ТП, дополненный функциональной оптимизацией профиля кулачкового вала ТНВД. Предложено его применить в общей схеме параметрической оптимизации ТА дизеля на этапе подготовки исходной информации для УМНЛР. Тогда УМНЛР показателей ТП будут составлены для уже оптимизированных профилей кулачковых валов.

Составлен ПРК для реализации численных примеров оптимизации параметров ТП с учетом программных разработок Григорьева А. Л. Имея начальные значения параметров и заданные значения ординат закона подачи требуется определить значения параметров ТА, наиболее близко обеспечивающие значения ординат дифференциального закона при стабильной цикловой подаче в интервале  $Q_{II}=50 \dots 70 \text{ мм}^3/\text{цикл}$  с шагом  $2.5 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ .

Информация для УМНЛР в численном примере 6.2 получена путем проведения ГД расчетов процессов ТП с оптимизацией профиля кулачкового валика. В каждом ГД расчете со стабильной подачей  $Q_{II}$  рассмотрены подтекала ординаты закона подачи  $Q_1, Q_2, \dots, Q_9$  и продолжительность ВТ  $\Delta\varphi_{\text{впр}}$  в град. Целевая функция определялась как сумма модулей разностей полученных расчетом значений ординат и заданных их значений. Для каждого из 72-х расчетов определено значение целевой функции  $\Delta Q_{\text{sum}}$  и продолжительность ВТ  $\Delta\varphi_{\text{впр}}$ . Для этих двух показателей получены два УМНЛР относительно нормализованных аналогов рассматриваемых уравнений по каждому варианту. УМНЛР выражены через нормализованные параметры и показатели. Следует отметить высокую адекватность полученных УМНЛР. Более высокие значения  $R_0$  по сравнению с представ-

ленными ранее численными примерами определяются включением в ГД расчет этапа оптимизации профиля кулачкового валика, а также автоматического подбора угла геометрического начала подачи. Производится минимизация вероятностного аналога целевой функции и сохранение неизменным значения вероятностного аналога второго показателя - продолжительности ВТ.

После определения значений параметров в конкретной форме производятся проверочные ГД расчеты с полученными значениями. Точность подбора параметров ТА по заданным ординатам закона подачи в значительной степени зависит от требуемых значений показателей  $Q_1$  и от начальных значений параметров ТА. Средняя по девяти проведенным в качестве численного примера вариантам расчетов погрешность подбора координат закона подачи составляет 15.87%.

К ТА дизелей предъявляется требование обеспечения высокой топливной экономичности. Необходимо обеспечить наилучшую топливную экономичность конкретного двигателя с определенными конструктивно-регулируемыми и режимными параметрами. При этом имеют место ограничения на максимальную величину давления сгорания и скорость его нарастания. Улучшить топливную экономичность целесообразно путем достижения минимального эффективного удельного расхода топлива.

Учет топливной экономичности при оптимизации параметров ТА можно осуществить путем прямого введения удельного эффективного расхода топлива в число рассматриваемых показателей. Для этого ГД расчет с подбором профиля кулачка дополняется расчетом процессов испарения и тепловыделения в цилиндре дизеля по методике Н. Ф. Разлейцева, а также расчетом рабочего процесса дизеля и определением его показателей по методике Н. М. Глаголева.

В ряде работ рассмотрена возможность построения индикаторной диаграммы по выражению /8/ при известном характере скорости тепловыделения

$$\frac{dP}{d\varphi} = \frac{dx}{d\varphi} \frac{(k-1) \cdot Q_{\omega} \cdot g_{\omega}}{V} - \frac{k \cdot P}{V} \frac{dV}{d\varphi} - \frac{P}{k-1} \frac{dk}{d\varphi} - \frac{k-1}{V} \frac{dQ_{\omega}}{d\varphi} \quad / 8 /$$

Здесь  $P$  - давление в цилиндре;  $\varphi$  - угол поворота кулачкового вала;  $x$  - относительная характеристика тепловыделения;  $V$  - объем над поршнем;  $k$  - показатель адиабаты сжатия;  $Q_{\omega}$  - потеря энергии вследствие теплоотдачи от газов к стенкам. Построение индикаторной диаграммы выполняется путем численного интегрирования выражения /8/ с определением в конце каждого шага интегрирования  $\Delta\varphi$  величины давления в цилиндре. Здесь применена относительная характеристика тепловыделения. Для аналитических расчетов предложено несколько полуэмпирических зависимостей характеристик тепловыделения: уравнения И. И. Вибера, Б. П. Пугачева, Б. М. Гончара, методика Э. С. Маца и др. Для расчета процессов испарения топлива, сгорания и тепловыделения применена методика определения характеристики тепловыделения, предложенная в работах Н. Ф. Разлейцева. Последовательно проводится расчет констант испарения, в зависимости от угла поворота расчет доли испарившегося топлива, тепловыделения на участке начальной вспышки топлива, на участке горения и догорания.

Рассмотренный алгоритм дополнил ГД расчет процесса ВТ с функциональной оптимизацией профиля кулачкового вала ТНВД. Расчет применен в общей схеме параметрической оптимизации ТА дизеля на этапе подготовки исходной информации для УМНЛР вместо использованных ранее методик. УМНЛР составлены для оптимизированных профилей кулачковых валов по показателям ТП и показателю экономичности двигателя в целом. Подготовлен

ПРК для реализации численных примеров оптимизации параметров ТП с учетом разработок Григорьева А. Л.

Дифференциальный закон топливоподачи задан девятью ординатами на границах десяти частей интервала ВТ. Эти значимые ординаты обозначены  $Q_1, Q_2, \dots, Q_9$ . В численном примере 6.3 для рассмотрения приняты комплексы исходных параметров, которые обеспечивают цикловые подачи  $Q_{Ц} = 50 \dots 70 \text{ мм}^3/\text{цикл}$  при стабильном от цикла к циклу остаточном давлении.

По начальным значениям параметров и заданным ординатам закона подачи необходимо определить значения параметров ТА, обеспечивающие требуемые ординаты дифференциального закона при стабильной цикловой подаче с минимальным фактическим эффективным расходом топлива.

Информация для УМНЛР получена путем проведения ГД расчетов процессов ТП, дополненных оптимизацией профиля кулачкового валика и расчетом рабочих процессов и показателей работы дизеля. В каждом ГД расчете со стабильной подачей  $Q_{Ц}$  рассмотрению подлежали ординаты закона подачи  $Q_1, Q_2, \dots, Q_9$  и эффективный удельный расход топлива  $g_e$  в г/кВт·ч. Целевая функция на первом этапе оптимизации определялась как сумма модулей разностей полученных расчетом значений ординат и заданных их значений. Неизменяемая функция -  $g_e$ . На втором этапе оптимизации минимизируемой целевой функцией становился удельный расход  $g_e$ , а неизменяемой функцией -  $\Delta Q_{\text{sum}}$ .

В численном примере осуществлялся подбор девяти вариантов ТА для  $Q_{Ц} = 50 \dots 70 \text{ мм}^3/\text{цикл}$  с шагом  $2.5 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ . Для каждого из 72-х расчетов определено значение целевой функции  $\Delta Q_{\text{sum}}$  и удельный эффективный расход топлива  $g_e$ . Для этих двух показателей на обоих этапах оптимизации получено по два УМНЛР относительно нормализованных аналогов рассмат-

риваемых уравнений по каждому варианту. УМНЛР выражены через нормализованные параметры и показатели.

Применяемая методика оптимизации предполагает вначале минимизацию вероятностного аналога целевой функции и сохранение неизменным значения удельного эффективного расхода топлива. На втором этапе оптимизации минимизируется  $\zeta_e$ , а  $\Delta Q_{\text{sum}}$  остается постоянным. В результате проведения двух этапов оптимизации определяется 18 значений исходных параметров для каждого из девяти вариантов. Далее проведены проверочные ГД расчеты с полученными значениями. Средняя погрешность подбора ординат закона подачи составляет 16,04%.

С целью проверки расчетных методик, уточнения влияния отдельных параметров на показатели работы ТА проведены расчетные исследования ТА тепловозного дизеля 6ЧН31.8/33 (ПДГ1М) (Численный пример 6.4). Первый этап исследований включал рассмотрение серийной базовой ТА, которая подлежала модернизации. Второй этап расчетных исследований - анализ влияния параметров ТА на показатели ее ТП. Рассмотрены два варианта оптимизации параметров ТА. Уменьшение продолжительности ВТ вызывалось увеличением  $d_{\text{п}}$ ,  $h_{\text{пм}}$  и  $f_c$ , уменьшением  $V_{\text{н}}$  и  $V_{\text{но}}$ . Определены параметры, которые достаточно сильно влияют на продолжительность ВТ и на давление топлива у форсунки, показана возможность уменьшения продолжительности ВТ путем оптимизации параметров ТА.

На третьем этапе проводились расчетные исследования влияния профилей кулачкового вала по продолжительности ВТ. Предложено контролировать дополнительно к максимальному подъему плунжера его максимальную скорость. Введена коррекция максимальной скорости в зависимости от значения максимального подъема плунжера  $h_{\text{пм}}$ . Путем параметрической оптими-

зации нескольких параметров (максимальный ход и скорость плунжера, объем надплунжерной полости, угол геометрического начала подачи, условный коэффициент сопротивления во впускном тракте форсунки) получена продолжительность ВТ  $\Delta p_{\text{впр}} = 18,72^\circ$  при максимальном давлении у форсунки  $P_{\text{фм}} = 67,9$  МПа. Эти результаты в целом сопоставимы с результатами экспериментальных исследований.

Целью четвертого этапа расчетных исследований явилось достижение адекватных результатов по окончательному расчету и эксперименту. Проведена расчетная реализация профиля кулачкового вала. Заданы и реализованы средняя скорость на горизонтальном участке трапеции и ускорение на спадающем участке графика скорости. Выполнен ГД расчет ТА с этим профилем. Получена аналогичная эксперименту продолжительность ВТ  $\Delta p_{\text{впр}} = 16,65^\circ$ . Уровень максимального давления в трубопроводе  $72 \dots 76$  МПа также соответствует экспериментальным данным.

В результате проведенных четырех этапов расчетных исследований получены параметры топливной аппаратуры для тепловозного дизеля БЧН-31.8/33 (ПДГ1М), обеспечивающие требуемую продолжительность впрыскивания и необходимый уровень давления в топливопроводе. Значения параметров и показателей этой аппаратуры адекватны результатам экспериментальных исследований в пределах их точности.

Использование газового топлива в дизелях имеет свои особенности по сравнению с двигателями искрового зажигания. Простейший вариант адаптации дизеля к газовому топливу включает в себя применение базовой ТА для подачи запальных порций топлива. Для анализа влияния площади сопловых отверстий  $f_c$  и доли цикловой подачи  $\%q_{\text{ц}}$  на работу ТА при

подаче запальных порций проведены серии ГД расчетов процессов ТП. Установлена стабильность на подачах больше 5 % от номинального значения. Поэтому приемлимым вариантом для адаптации ТА к режиму газодизеля является уменьшение площади сопловых отверстий распылителя в три раза и регулировка на 5 %-ную подачу.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе поставлена и решена научно-техническая проблема разработки метода определения конструктивно-регулируемых параметров топливной аппаратуры дизеля по заданным характеристикам впрыскивания.

1. Разработанная впервые методика определения конструктивно-регулируемых параметров модернизируемой и вновь создаваемой топливной аппаратуры, в основу которой положено применение в оптимизационных методах уравнений множественной нормализованной линейной корреляции, позволяет с достаточной для практики точностью получить необходимые для проектирования конструктивно-регулируемые параметры. Это дает возможность существенно сократить время и средства на проведение экспериментальных доводочных работ.

2. В диссертационной работе установлено и подтверждено численными примерами, что взаимосвязи между показателями и параметрами топливной аппаратуры дизеля могут быть выражены уравнениями множественной нормализованной линейной регрессии. Для учета нелинейности этих взаимосвязей, для их выравнивания и нормализации осуществляется замена переменных (параметров и показателей) на их вероятностные аналоги. Это два преобразования исходных переменных: конкретные значения каждой переменной - в их эмпирические вероятности непревышения и эмпирические вероятности непревышения - в соот-

ответствующие им квантили нормального распределения. Применение нормализованных переменных в линейных уравнениях регрессии позволяет значительно увеличить точность описания многомерного пространства показателей и параметров топливоподачи.

3. Примененный в диссертации метод обработки исходной информации при получении уравнений регрессии включает в себя определение доли вклада каждого параметра в уравнение множественной нормализованной линейной регрессии. В работе показана возможность и приведены примеры объективного анализа влияния конкретного параметра, обоснованного исключения из рассмотрения слабо влияющих параметров и упрощения уравнений регрессии.

4. Примененная в диссертационной работе линейная модель для описания многомерного пространства показателей и параметров топливной аппаратуры весьма приемлема для проведения оптимизации ее параметров. Для оптимизации топливной аппаратуры дизелей обосновано применение градиентного метода в различных вариантах, а также использование методов линейного программирования.

5. В работе приведен численный пример решения задачи синтеза топливной аппаратуры дизеля путем решения системы линейных уравнений регрессии относительно параметров топливной аппаратуры при заданных показателях. Отклонение полученных расчетом показателей топливоподачи от заранее заданных составляет 0,9...10,5 % и определяется только достоверностью уравнений регрессии.

6. В диссертации предложены и реализованы на ЭВМ алгоритмы трех градиентных схем оптимизации топливоподачи в дизелях: максимизация цикловой подачи  $q_{ц}$  при наличии линей-

ных двухсторонних ограничений ординат дифференциального закона подачи; минимизация целевой функции в виде суммы модулей отклонений ординат дифференциального закона подачи при наличии жесткого ограничения одного из показателей; поиск области допустимых решений.

7. Для реализации заданных характеристик впрыскивания путем оптимизации конструкторско-регулируемых параметров разработан программный комплекс. Его структура включает в себя такие части: подпрограмма гидродинамического расчета, подпрограмма обработки результатов гидродинамических расчетов с получением регрессионных зависимостей, подпрограмма оптимизации. Программный комплекс - это законченное программное изделие. Он может использоваться для оптимизации показателей топливоподачи как автономно, так и в составе других комплексов.

8. Для учета конструктивных и технологических требований к кулачковому валу топливного насоса высокого давления в работе предложено осуществлять подбор оптимального профиля кулачкового вала на этапе подготовки исходной информации для уравнений множественной нормализованной линейной регрессии и совмещать этот процесс с гидродинамическим расчетом топливной аппаратуры. Это реализовано на уровне алгоритма и программы в численном примере. Уравнения регрессии в этом случае составлены для уже оптимизированных профилей кулачковых валов. Средняя погрешность ординат закона подачи по девяти вариантам расчетов составляет 15,9 %.

9. Проведенные расчетные исследования топливной аппаратуры тепловозного дизеля 6ЧН 31.8/33 (ПДГ1М) позволили сделать вывод, что наиболее значительное сокращение продолжительности впрыскивания топлива при сохранении требуемого

уровня давления топлива достигается путем увеличения хода плунжера и его скорости в период активного хода, а также уменьшением гидравлического сопротивления фильтра и подводящих каналов форсунки.

10. В результате проведения гидродинамических расчетов процессов топливоподачи для анализа влияния  $f_c$  и доли  $q_{ц}$  на работу топливной аппаратуры газодизеля при подаче запальных порций установлено, что при номинальной площади сопловых отверстий и 5...15 %- ной подаче уровень давлений топлива у насоса и форсунки недостаточен для качественного распыливания и смесеобразования. При уменьшении этой площади стабильность подачи и уровень давления достаточно возрастают. Поэтому, приемлимым вариантом для адаптации топливной аппаратуры к режиму газодизеля является уменьшение площади сопловых отверстий в три раза и регулировка на 5 %-ную подачу.

11. Сравнение результатов расчетных исследований с опытными данными испытаний одноцилиндрового двигателя НИКТИД (г. Владимир) размерности ЧН-13/14, состоящее в реализации четырех вариантов аппаратуры, аналогичных рассмотренным экспериментально, показало их удовлетворительную сходимость для решения практических задач.

Адекватность опытным данным численных экспериментов по тепловозному дизель ПДГ1М подтверждена окончательным гидродинамическим расчетом по полученным из оптимизационной схемы параметрам и по принятому трехрадиусному с вогнутым участком профилю кулачкового вала топливного насоса высокого давления. Продолжительность впрыскивания по окончательному расчету составляет  $16.65^\circ$  кулачкового валика. А для экспериментальной модернизированной аппаратуры при аналогичной

подаче она составляет 16,50°. Максимальное давление у насоса составляет соответственно 72,1 и 75,2 МПа. Скорость плунжера в период активного хода - 182,5 и 184,0 см/с. Т.о., расчётным путем получена аналогичная эксперименту продолжительность впрыскивания. Уровень максимального давления в трубопроводе также соответствует экспериментальным данным.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Морозов Ю.В. Комплексное влияние параметров топливной системы дизеля на величину цикловой подачи. -Известия высших учебных заведений. -Машиностроение. -1977, #9.

2. Морозов Ю.В. О комплексном влиянии параметров топливной системы дизеля на некоторые показатели ее работы -Исследование конструкции, эксплуатации и надежности топливо-подающих систем автотракторных дизелей: Сб. науч. работ. -Саратов: ССХИ, 1978, -вып.116. -с.178...183.

3. Морозов Ю.В. Метод определения исходных параметров топливной аппаратуры по ее конечным показателям. -Двигателестроение. -1982, #9.

4. Морозов Ю.В., Морозова С.А. Номографирование уравнений регрессии со многими переменными. Гидромелиорация и гидротехническое строительство. Респ. межвед. научно-техн. сборник. -Львов: -Высшая школа. -1982, вып.10.

5. Морозов Ю.В. Метод определения исходных параметров топливной аппаратуры дизеля по ее заданным конечным показателям. -Двигателестроение. -1986, #11.

6. Морозов Ю.В. Линейные уравнения регрессии показателей впрыскивания топлива в дизелях. -Двигателестроение. -1988 #2.

7. Петин И.А. Морозов Ю.В. Управление работой топ-

ливоподающей аппаратуры дизелей с помощью методов теории подобия. -М. -Известия вузов. Машиностроение. -1971, #4.

8. Петин И. А., Морозов Ю. В. Применение теории подобия при исследовании динамики нагнетательного клапана топливopoдающей аппаратуры дизелей. -М.: -Известия вузов. Машиностроение. -1972, #5.

9. Файнлейб Б. Н., Морозов Ю. В. Метод оптимизации параметров топливной аппаратуры дизелей. -Двигателестроение. -1990, # 7.

10. Петин И. О., Морозов Ю. В., Гуркевич Ю. О. Про використання методів подібності для розрахунку та керування роботами паливopoдаючих апаратів дизельних двигунів будівельно-меліоративних машин. - "Актуальні проблеми меліоративного і водогосподарського будівництва". Видавниче об'єднання "Вища школа", Львів, 1973.

11. Морозов Ю. В., Шушко С. С. Об определении дифференциальной характеристики впрыска топлива в дизелях. - "Гидромелиорация и гидротехническое строительство", вып. 8. Респ. межвед. научн.-техн. сборник. Львов, "Вища школа", изд-во при Львов. ун-те, 1980.

12. Морозов Ю. В. Определение параметров топливной аппаратуры по заданным ординатам дифференциального закона подачи - Тез. докл. научно-технического семинара "Диагностика, повышение эффективности экономичности и долговечности двигателей", Ленинград-Пушкин, 1990.

13. Марчук Н. М., Морозов Ю. В. Применение измерительного комплекса К736 для исследования работы тракторного дизеля. - Тез. докл. научно-технического семинара "Диагностика, повышение эффективности экономичности и долговечности двигателей", Ленинград-Пушкин, 1990.

14. Морозов Ю. В. Алгоритм оптимального профілювання кулачків паливного насоса дизеля. - Тези доповідей науково-технічної конференції УІІВГ, Рівне, 1992.

15. Косир С. Г. Морозов Ю. В. Методи вимірювань показників паливної апаратури дизеля. - Тези доповідей науково-технічної конференції УІІВГ, Рівне, 1995.

Morozov Yu.V. Realization of the predetermined characterizations of the fuel injection by the means optimization of design-regulative parameters of fuel equipment.

The dissertation for presenting doctor's degree of technical sciences on speciality 05.04.02, heat engines, Ukrainian institute of water management engineers, Rovno, 1995.

Calculative definition methods of optimizing values of design-regulative parameters of fuel equipment and results of numeral examples presented in 17 scientific papers, are submitted for defence. Precision of indices realization was equal about 15%. Methods were realized as programming complexes for ECM and personal computers.

Морозов Ю.В. Реализация заданных характеристик впрыскивания топлива путем оптимизации конструктивно-регулируемых параметров топливной аппаратуры.

Диссертация на соискание ученой степени степени доктора технических наук по специальности 05.04.02 - тепловые двигатели. Украинский институт инженеров водного хозяйства, Ровно, 1995.

На защиту вынесены методы расчетного определения оптимальных значений конструктивно-регулируемых параметров топливной аппаратуры по заданным ее показателям и результаты их реализации в численных примерах, изложенные в 17 научных работах. Точность реализации показателей составляет около 15 %. Методы реализованы в виде программных комплексов для ЭВМ и персональных компьютеров.

Ключові слова: множинна нормалізована регресія, градієнтно-статистичний, оптимізація, ординати закону подачі.

Ав 33.863

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА  
ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНО-РЕГУЛИРОВОЧНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ

МОРОЗОВ Юрий Валентинович

Ответственный за выпуск  
к. т. н., доцент Савенко В.В.

---

Подписано до друку 07. XII. 95.  
Формат 60x84 I/16 Объем 2.0 др. арк.  
Замовлення 1130 Тираж 100 прим. Грн.  
Рівне. УІІВГ, Соберна, II