

На правах рукописи

Новичков Михаил Юрьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОДИЗЕЛЯ

Специальность 05.04.02 – "Тепловые двигатели"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2004

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», на кафедре двигателей внутреннего сгорания.

Научный руководитель - кандидат технических наук, профессор  
Галышев Юрий Витальевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Николаенко Анатолий Владимирович

кандидат технических наук, профессор  
Нестеренко Игорь Федорович

Ведущая организация – ФГУП «Центральный научно-исследовательский дизельный институт»

Защита состоится « \_\_\_\_ » 2004 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Главное здание, ауд. \_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » 2004 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 212.229.09  
д.т.н., профессор

Хрусталеv Б.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современное двигателестроение, являющееся основной энергетической базой транспортных установок, сталкивается с двумя взаимосвязанными проблемами - истощением нефтяных запасов и загрязнением воздушного бассейна планеты из-за токсичных выбросов с отработавшими газами. Использование альтернативных топлив в той или иной мере позволяет решить эти две проблемы.

В числе альтернативных топлив наиболее перспективным на ближайшее будущее представляется природный газ. Моторные свойства газа позволяют использовать его в качестве топлива для двигателей почти без переделок базовых моделей. При этом мощность установки может быть сохранена, экономичность увеличена, а содержание токсичных составляющих отработавших газов - уменьшено.

В практике перевода дизелей на газовое топлива достаточно широкое распространение получили газодизели. Этому не в последнюю очередь способствовала простота перевода двигателя с одного топлива на другое при минимальных изменениях конструкции. Несмотря на то, что основные принципы действия газодизеля достаточно изучены, конструирование каждой новой модели начинается практически с нуля, поскольку имеющиеся рекомендации имеют качественный характер и основаны только на опыте создания и эксплуатации конкретных двигателей. В частности, нет достаточно четких рекомендаций по рациональному закону регулирования газодизеля. Для того чтобы поставить проектирование газодизелей и прогнозирование их эксплуатационных, экономических и экологических характеристик на научную основу, необходимо углубленное изучение особенностей газо-жидкостного рабочего процесса, которое должно дать материал для разработки адекватных математических моделей таких процессов. Существующие экспериментальные данные и их трактовка достаточно противоречивы. В особенности мало исследованы процессы сгорания и параметры, определяющие их протекание.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью диссертации является улучшение экономических и экологических показателей газодизеля за счет совершенствования рабочего процесса на основе уточненного физического и математического описания основных процессов, протекающих в цилиндре газодизеля.

**Достижение указанной цели потребовало решения следующих задач:**

1. Создания экспериментальной установки с газодизельным двигателем и оснащение ее информационно-измерительным комплексом, обеспечивающим исследование особенностей рабочего процесса.
2. Проведения эксперимента для оценки влияния различных факторов на мощностные, экономические, экологические характеристики и параметры рабочего процесса газодизеля.
3. Теоретического анализа и математического описания зависимостей

между основными параметрами, определяющими скорость тепловыделения, и регулировочными и режимными параметрами цикла.

4. Формулировки основных зависимостей математической модели рабочего цикла газодизеля на основе полученного описания характеристики тепловыделения.

5. Определения алгоритма управления составом газозвдушной смеси, запальной дозы дизельного топлива и угла опережения подачи топлива для судового газодизеля.

**Объект исследования.** Судовой газодизельный двигатель 6Ч15/18 (ЗД6).

**Предмет исследования.** Мощностные, экономические и экологические характеристики и определяющие их рабочие процессы, протекающие в цилиндре газодизеля.

**Методы исследования.** В основу методики исследования положено сочетание теоретического анализа физических закономерностей процессов, протекающих в цилиндре двигателя, экспериментальных и расчетных исследований.

**Достоверность результатов** исследований определяется

- физической обоснованностью принятых теоретических предпосылок;
- достаточной точностью применявшегося информационно-измерительного комплекса;
- согласованием полученных зависимостей с теоретическими положениями и данными экспериментов.

**Научная новизна работы** заключается в том, что в ней впервые сформулирована физически обоснованная модель сгорания и тепловыделения в газодизеле и предложены зависимости для определения ее исходных параметров.

**Практическая значимость.**

1. Получены рекомендации по улучшению показателей судового газодизеля при работе по винтовой характеристике.

2. Зависимости, полученные путем экспериментально-теоретического исследования, могут быть использованы для расчетного прогнозирования параметров газодизеля и выбора рациональных конструктивных и регулировочных решений.

**Реализация результатов работы.** Полученные рациональные зависимости регулирования состава газозвдушной смеси, запальной дозы дизельного топлива и угла опережения подачи топлива использованы при конвертировании главных двигателей судна проекта Р51 Санкт-Петербургского Пассажирского порта на газодизельный цикл. Материалы исследований используются в учебном процессе на кафедре «Двигатели внутреннего сгорания» Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета при подготовке магистров и аспирантов.

**Основные положения диссертационной работы,** выносимые на защиту:

1. Физическая и математическая модель протекания рабочего процесса и особенности процессов сгорания в газодизеле.
2. Результаты экспериментального исследования специфики рабочих процессов в газодизеле.
3. Физически обоснованные и экспериментально подтвержденные зависимости параметров тепловыделения в газодизеле от исходных условий в цилиндре.
4. Полученные зависимости регулирования состава газовой смеси, запальной дозы дизельного топлива и угла опережения подачи топлива судового газодизеля.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были доложены на:

- научной конференции «Топливо - двигатель - экологически чистая система, проблемы Северо-западного региона», Санкт-Петербург, ГИПХ, 2003.
- Всероссийском конгрессе двигателестроителей, Санкт-Петербург, ЦНИДИ, 2003.
- международной научно-практической конференции «Безопасность водного транспорта», СПГУВК, 2003
- ежегодных научно-технических конференциях СПбГУ, Санкт-Петербург, 2000 – 2004

**Публикации.** Основные положения диссертации изложены в 9 печатных работах.

**Структура и объем работы.** Диссертация включает в себя: введение, четыре главы, заключение, список литературы. Содержит 153 страницы основного текста, в том числе 69 рисунков, 3 таблицы, список использованных источников из 101 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы и цели настоящей работы. Представлена краткая аннотация последней.

**В первой главе** изложен общий обзор литературы по теме диссертации. Вопросам разработки и исследования газодизельных процессов посвящены работы ряда отечественных и зарубежных ученых, таких как Генкин К.И., Коллеров Л.К., Васильев Ю.Н., Ксенофонтов С.И., Равкинд А.А., Долганов К.Е., Капустин А.А., Лиханов В.А., Karim, G. A., Varde, K. S., Liu. Z., Tanaka, T., Takahashi, N. и др.

Показано, что при переводе дизеля на газодизельный цикл можно обеспечить существенную экономию дизельного топлива и уменьшение токсичных выбросов с отработавшими газами при сохранении паспортной мощности двигателя без снижения его надежности и долговечности. Анализ различных схем регулирования мощности газодизелей показывает, что возможно применить качественное регулирование, однако для обеспечения стабильной и экономичной работы на режимах малых нагрузок желательно тем или иным

способом обогащать смесь на этих режимах. С этой целью предложены различные схемы и алгоритмы регулирования подачи топлива, но единое мнение по вопросам их выбора отсутствует.

Имеющиеся экспериментальные данные о влиянии различных факторов на динамику тепловыделения, жесткость процесса сгорания, максимальные давления сгорания, задержку самовоспламенения противоречивы и не находят физически обоснованных объяснений.

Основная причина таких разногласий заключается в отсутствии достаточно детализованного и допускающего математическую формулировку описания процессов сгорания в газодизеле.

Предложенные в литературе формулы для расчета характеристик тепловыделения газодизеля являются чисто эмпирическими и имеют весьма узкий диапазон применения.

По результатам анализа публикаций сформулированы задачи исследования, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

**Вторая глава** посвящена описанию методики экспериментального исследования. Разработаны методы экспериментального исследования, позволяющие установить влияние различных параметров, определяющих внешнее воздействие на объект регулирования – газодизель. В число варьируемых параметров, влияющих на рабочий процесс газодизеля, вошли: величина запальной дозы дизельного топлива, угол опережения впрыска дизельного топлива, степень дросселирования газозвдушной смеси на впуске.

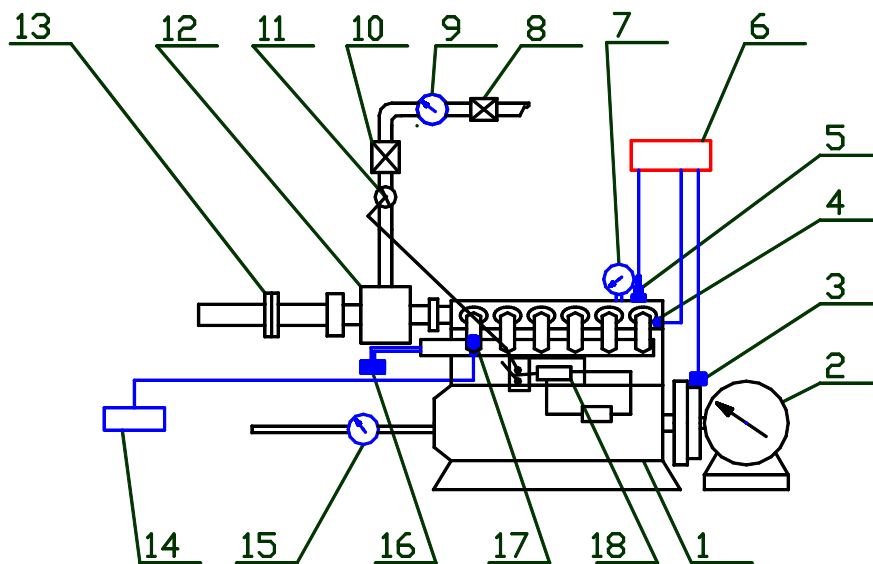


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – двигатель, 2 – нагрузочное устройство, 3 – датчик угла поворота коленчатого вала, 4 – датчик внутрицилиндрового давления, 5 – датчик подъема иглы форсунки, 6 – персональная ЭВМ с модулем аналого-цифрового преобразователя, 7 – вакуумметр, 8 – газовый кран, 9 – газовый расходомер, 10 – электромагнитный клапан, 11 – регулятор расхода газа, 12 – газовый смеситель с регулятором расхода газозвдушной смеси, 13 – расходомер воздуха, 14 – потенциометр, 15 – расходомер жидкого топлива, 16 – газоанализатор, 17 –

термопара, 18 – модифицированный ТНВД.

Для проведения экспериментального исследования была разработана экспериментальная установка на базе судового двигателя 3Д6, дооборудованного необходимой газовой топливоподающей аппаратурой и системой регулирования подачи жидкого и газового топлива (рис.1).

В соответствии с задачами исследования, особое внимание было обращено на получение индикаторных диаграмм в цифровом виде, допускающем прямой ввод экспериментальных данных для обработки в ЭВМ. Для этого был разработан информационно-измерительный комплекс, обеспечивающий ввод в ПЭВМ, обработку и регистрацию в реальном масштабе времени давления в цилиндре, подъема иглы форсунки и текущих значений угла поворота коленчатого вала.

В главе приведены зависимости для обработки регистрируемых параметров и оценка погрешностей результатов экспериментального исследования. Обращено особое внимание на учет при обработке индикаторных диаграмм особенностей газожидкостного рабочего процесса (суммарной теплоты сгорания двух топлив, коэффициентов избытка воздуха - суммарного и газозвоздушной смеси, текущих теплоемкостей рабочего тела).

**Третья глава** содержит описание программы испытаний и результатов экспериментального исследования. Как показали экспериментальные исследования по влиянию запальной дозы топлива на показатели рабочего процесса двигателя 6Ч15/18 при работе на номинальном режиме (рис. 2а), реализация газожидкостного цикла обеспечивается при минимальных запальных порциях дизельного топлива, соответствующих 15% подводимой теплоты. Как показывает зависимость эффективного КПД от запальной порции топлива, по мере ее снижения возрастает эффективность преобразования энергии топлива в полезную работу. Это связано с обогащением газозвоздушной смеси и более быстрым ее сгоранием. Возрастание максимального давления и жесткости процесса сгорания при увеличении запальной порции, полученное в результате эксперимента, объясняется увеличением количества топлива, подготовленного к сгоранию на момент воспламенения. По этой же причине наблюдается возрастание выбросов  $\text{NO}_x$ , которые интенсивно образуются в первой фазе процесса сгорания. Увеличение запальной дозы приводит к некоторому возрастанию дымности отработавших газов, однако по сравнению с дизелем она меньше в 4 – 10 раз.

Сравнение показателей рабочего процесса при работе двигателя в дизельном и газодизельном режиме работы при различных углах опережения впрыска топлива (рис. 2б) показало, что при увеличении угла опережения впрыска до значения 30 градусов ПКВ до ВМТ происходит рост эффективного КПД, как для дизельного, так и для газодизельного режимов, однако скорость этого роста различна, в связи, с чем при значительном увеличении угла опережения впрыска эффективный КПД газодизеля оказывается выше КПД дизеля. Для дизельного и газодизельного режимов работы при увеличении угла опережения впрыска прослеживается возрастание «жесткости» и максимального давления сгорания в

диапазоне от 51 до 67 бар. Температуры отработавших газов газодизеля близки к таковым у дизеля при больших углах опережения. С уменьшением угла опережения впрыска запального топлива температуры отработавших газов газодизеля возрастают быстрее, чем у дизеля.

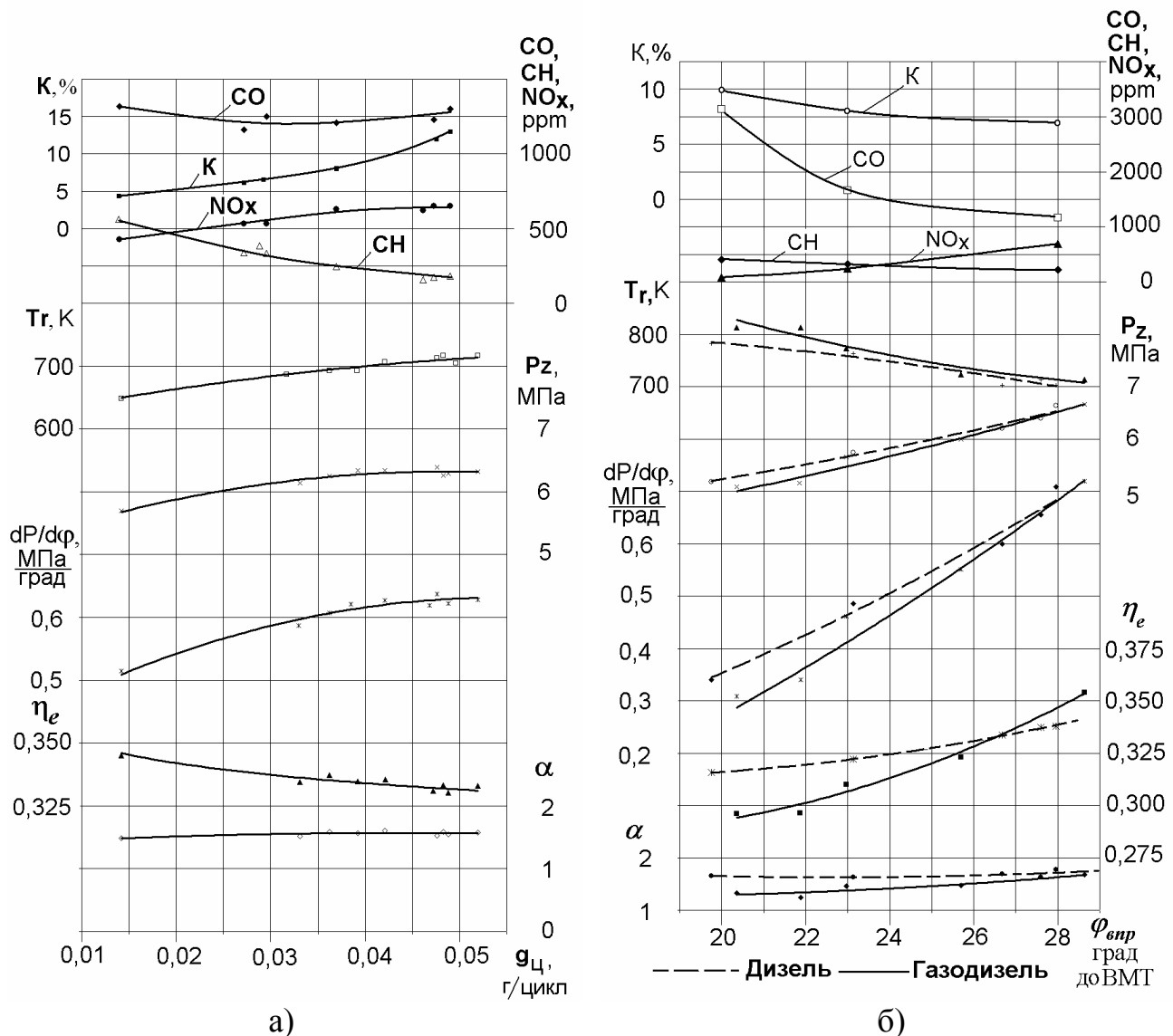


Рис. 2. Параметры рабочего процесса, дымности и токсичности отработавших газов газодизеля 3Д6 при изменении запальной порции дизельного топлива (а) и угла опережения впрыска (б) на номинальном режиме работы ( $N_e=110$  кВт,  $n=1500$  мин<sup>-1</sup>).

Дымность отработавших газов и выбросы продуктов неполного сгорания ( $CO$ ,  $CH$ ) газодизеля снижаются при увеличении угла опережения впрыска, однако выбросы  $NO_x$  - увеличиваются.

Исследование влияния дросселирования газоздушной смеси на экономические и экологические характеристики судового газодизеля показало, что применение смешанного регулирования при работе двигателя по винтовой характеристике позволяет повысить эффективный КПД и уменьшить выбросы  $CH$ . При этом на малых нагрузках предпочтительнее активное дросселирование газоздушной смеси, со снижением эффекта дросселирования по мере



приближения к номинальному режиму.

**В четвертой главе** проведен теоретический анализ и предложено математическое описание процессов воспламенения и сгорания рабочей смеси в цилиндре газодизеля.

В отличие от дизеля, при газожидкостном процессе в камере сгорания одновременно находится гомогенная газозвушная смесь и дизельное топливо, выгорание которых происходит по различным механизмам. В связи с этим процесс сгорания в газодизеле нельзя описывать моделью объемного воспламенения, принятой для дизельных двигателей; нельзя также опираться на традиционную для двигателей с принудительным воспламенением модель распространения фронта пламени по объему камеры сгорания. Надо учитывать оба этих процесса с определенными допущениями (рис. 3). Так, можно считать, что на момент подачи форсункой жидкого топлива ( $\varphi = -\varphi_{\text{впр}}$ , углы отсчитываются от ВМТ) в камере сгорания присутствует гомогенная газозвушная смесь, которой присуще некоторое движение в объеме, ограниченном поверхностями цилиндра, поршня и головки цилиндров. После впрыска топлива, за период задержки воспламенения ( $\varphi = -\varphi_{\text{впр}} + \varphi_i$ ) форма факела топлива, впрыснутого в цилиндр, приобретет некий деформированный вид, в объеме которого будут находиться воздух, газ и дизельное топливо.

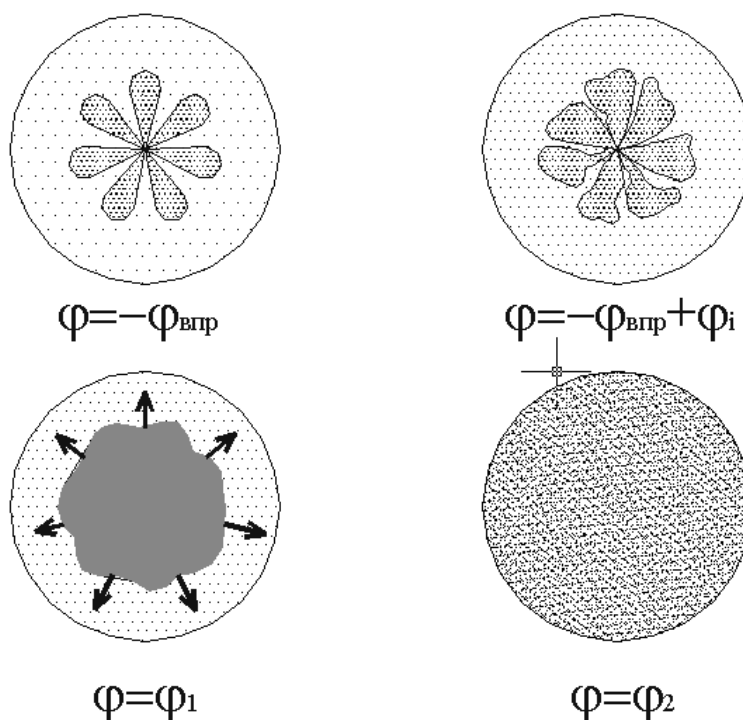


Рис. 3. Стадии сгорания при газожидкостном процессе.

После воспламенения дизельного топлива ( $\varphi = \varphi_1$ ), находящегося в обогащенной зоне камеры сгорания, происходит быстрое сгорание воспламенившейся топливовоздушной смеси. Одновременно фронт пламени начинает распространяться в районы более бедной газозвушной смеси. С этого момента можно проводить определенную аналогию с процессами выгорания топлива в двигателях с принудительным воспламенением. При определенных

допущениях (малой запальной порции топлива, незначительной деформации топливного факела, связанной с незначительностью временного промежутка отводимого на период задержки воспламенения) можно считать, что при сгорании газозвушной смеси происходит продвижение фронта пламени от периферии топливного факела до стенок камеры сгорания ( $\varphi = \varphi_2$ ).

Точное математическое описание всей совокупности процессов, результатом которых является воспламенение и выгорание топлива, весьма затруднительно.

Компромиссным решением, основанным на современном уровне знаний, является использование экспериментальных данных в качестве базовых и пересчет параметров на новые условия с учетом физических представлений о процессе и некоторых опытных зависимостей.

1. *Задержка самовоспламенения.* Обычно предполагается, что механизм воспламенения запального жидкого топлива такой же, как и в дизельном двигателе, и продолжительность этого процесса может рассчитываться по зависимостям типа

$$\tau_i = A p_0^{-m} e^{E/RT_0},$$

в которые вводятся температура и давление рабочего тела в течение соответствующего периода.

Однако экспериментальные данные (рис. 4) показывают, что при одинаковых углах начала подачи топлива длительность задержки самовоспламенения в газодизеле превышает соответствующую величину для дизеля. Анализ вероятных причин этого явления позволяет предположить, что причиной является активная роль метановых молекул, окружающих очаги самовоспламенения и действующих в качестве ингибитора. Для учета этого явления необходимо скорректировать энергию активации, которая по нашим данным составляет 22 кДж/моль по сравнению с 20,8 кДж/моль для смеси паров дизельного топлива с воздухом.

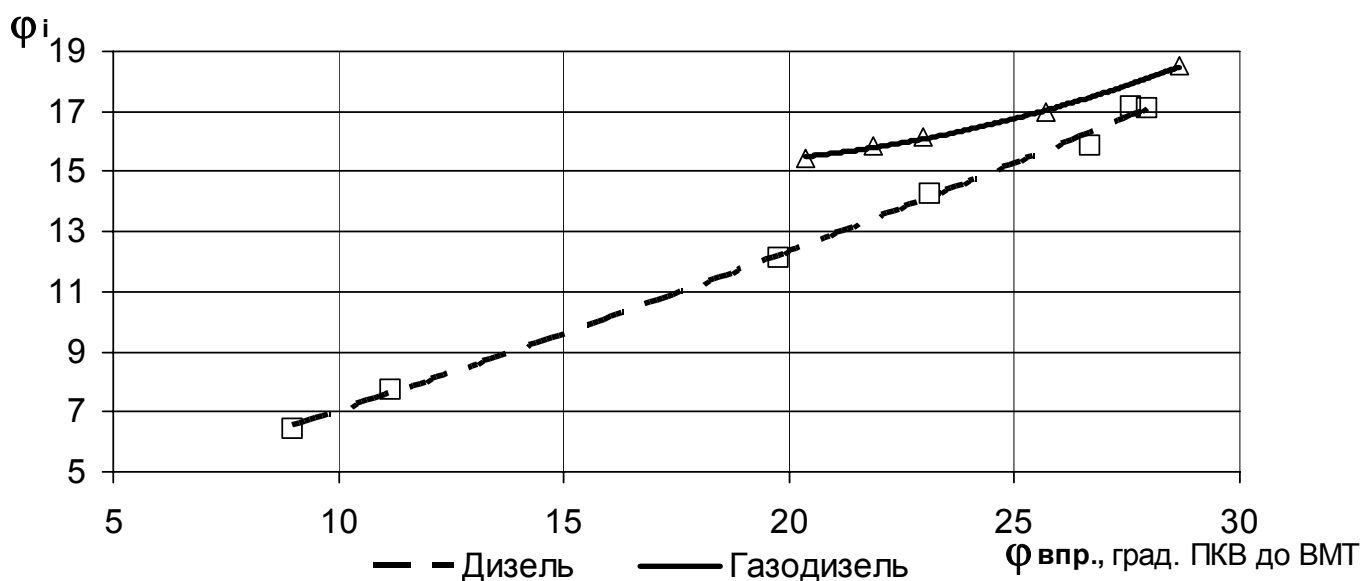


Рис. 4. Влияние угла опережения впрыска на задержку воспламенения при дизельном и газодизельном процессе.

2. *Тепловыделение в период быстрого сгорания.* Многочисленные эксперименты на дизельных двигателях показывают, что суммарное количество теплоты, выделяющейся в этой фазе, определяется массой топлива, поданного в цилиндр и подготовленного к сгоранию за период задержки самовоспламенения.

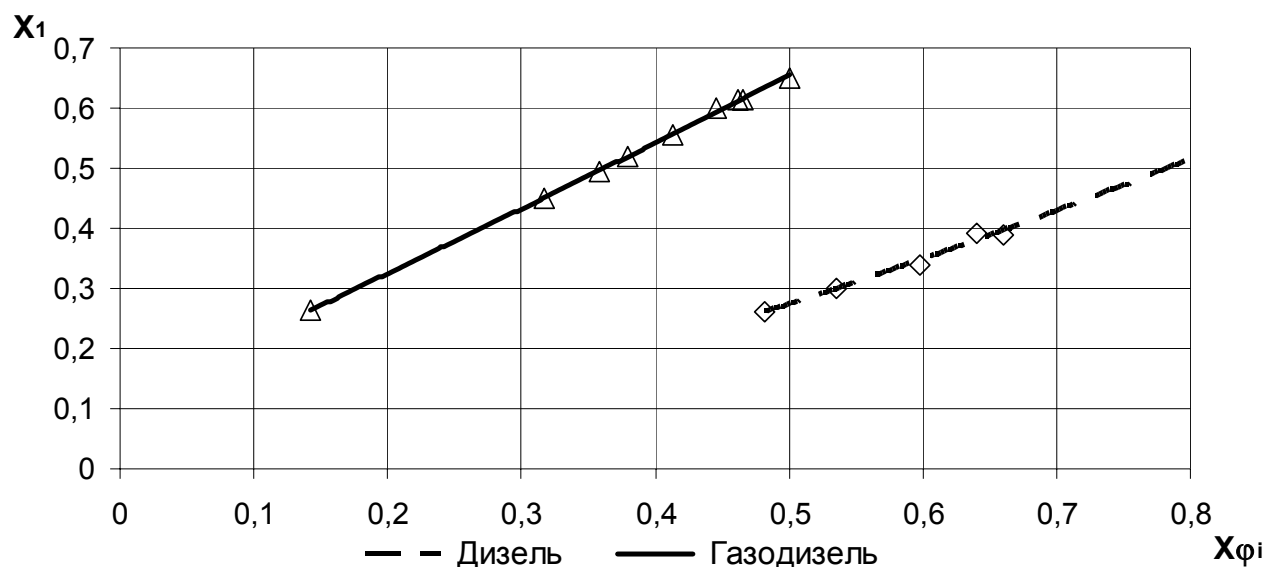


Рис. 5. Зависимость доли выгоревшего топлива в первой фазе сгорания от доли теплоты подведенной за период задержки воспламенения.

Поскольку в газодизеле продолжительность задержки самовоспламенения превышает продолжительность впрыска запального топлива, можно считать, что здесь это количество теплоты определяется величиной запальной порции жидкого топлива. Однако по результатам эксперимента (рис. 5) при равных количествах теплоты, введенной с дизельным топливом за время задержки самовоспламенения, величина  $X_1$  у газодизеля выше, чем у дизеля. Это позволяет сделать вывод о совместном сгорании в течение первой фазы дизельного топлива и газа находящегося в зоне факела топлива впрыснутого в цилиндр за период задержки воспламенения. Предложена формула, позволяющая ввести соответствующую поправку в оценку  $X_1$ , исходя из того, что в быстрое сгорание вовлекается часть газовоздушного заряда, соответствующая стехиометрическому соотношению дизельного топлива и воздуха:

$$X_1 = \frac{\left( \frac{G_{d\tau i} L_{od}}{\alpha(G_d L_{od} + G_2 L_{o2})} \right) \cdot G_2 Q_2 + G_d Q_d}{G_2 Q_2 + G_d Q_d}$$

где  $G_{d\tau i}$  – запальная порция топлива,  $L_{od}$ ,  $L_{o2}$  – стехиометрические соотношения для дизельного и газового топлив,  $G_2$ ,  $G_d$  – расходы газового и дизельного топлив,  $Q_2$  – низшая теплота сгорания газового топлива,  $Q_d$  – низшая теплота сгорания дизельного топлива,  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

Динамика выгорания в этой фазе описывается экспонентой, причем интервал от начала сгорания до достижения максимума скорости тепловыделения для большинства исследованных двигателей укладывается в диапазон 2-3 градуса ПКВ.

3. *Сгорание гомогенной газовой смеси.* Согласно рис. 3, этот участок динамики тепловыделения связан с распространением пламени от источника воспламенения до стенки камеры сгорания и последующим догоранием смеси за фронтом пламени.

Для второй фазы сгорания определяющим параметром является угол  $\varphi_2$ , при котором достигается второй максимум скорости тепловыделения. Теоретический анализ позволил предположить, что определяющую роль здесь играют факторы, влияющие на скорость распространения турбулентного пламени, в числе которых основными являются коэффициент избытка воздуха и температура смеси перед фронтом пламени.

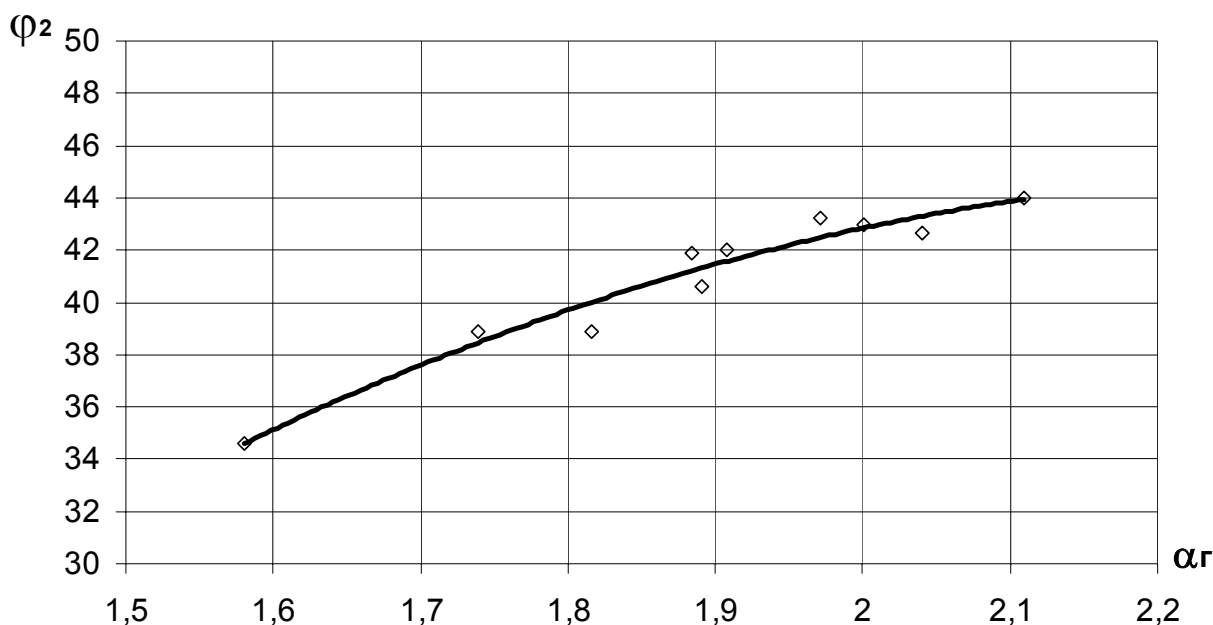


Рис. 6. Зависимость показателя  $\varphi_2$  от коэффициента избытка воздуха.

Приведенная на рис. 6 зависимость показателя  $\varphi_2$  от коэффициента избытка воздуха при постоянной частоте вращения хорошо согласуется с теоретическим представлением о влиянии концентрации горючего в смеси с окислителем – при обеднении газовой смеси происходит замедление скорости сгорания, связанное с отводом из реакционной зоны теплоты на нагрев воздуха в зоне не сгоревшей газовой смеси. Исследования скорости распространения фронта пламени в зависимости от температуры подогрева реагирующих газовой смеси проведенные на бунзеновских горелках и при распространении фронта пламени в трубах позволяют сделать вывод о допустимости аппроксимации такой зависимости степенной функцией с показателем степени 1,6-2,0.

Обычно признается, что скорость распространения турбулентного пламени пропорциональна, при прочих равных условиях, частоте вращения коленчатого вала. Однако в действительности определяющим фактором является не частота вращения как таковая, а скорость затекания смеси в цилиндр. Поэтому в зависимость, аппроксимирующую изменение величины  $\varphi_2$  от параметров режима двигателя, была добавлена переменная, отвечающая за турбулизацию свежего

заряда, которая пропорциональна объему поступившей смеси для данных оборотов коленчатого вала двигателя. Таким образом, был получен безразмерный комплекс, включающий в себя коэффициент избытка воздуха, температуру, объем поступающей газовой смеси и обороты коленчатого вала двигателя на исходном и исследуемом режимах.

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_{20}} \approx \frac{(T)^{-1.6}(\alpha)(V/n)}{(T_0)^{-1.6}(\alpha_0)(V_0/n_0)} = \frac{K}{K_0}$$

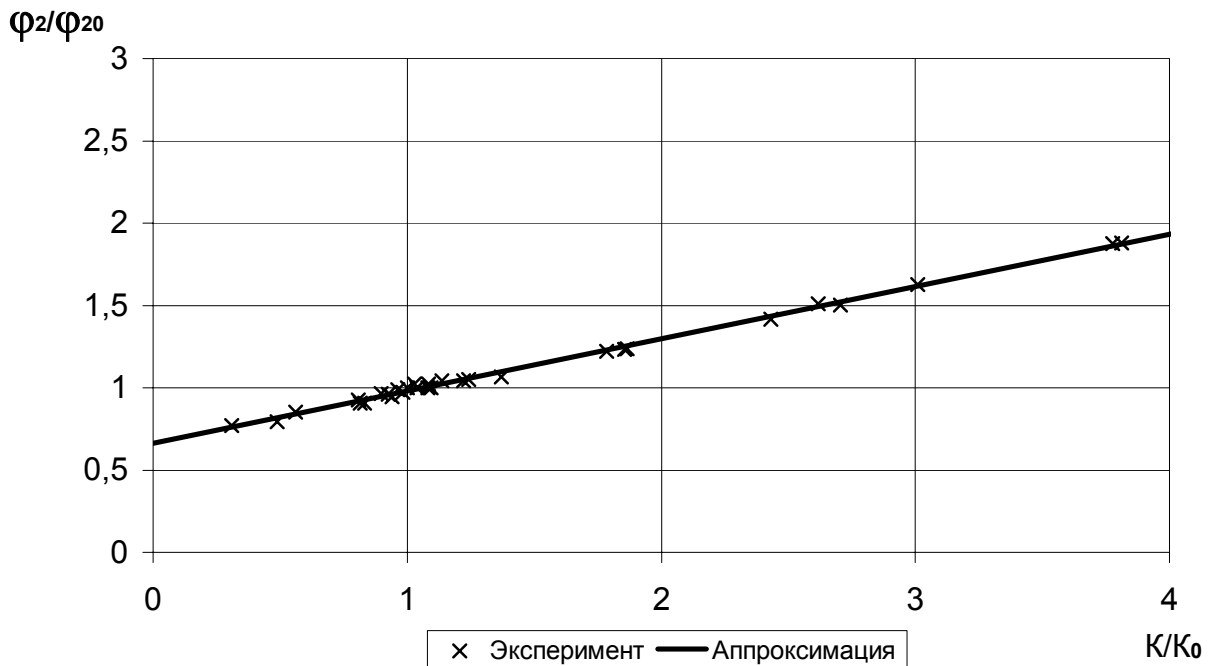


Рис. 7. Зависимость относительного угла выгорания во второй фазе сгорания от безразмерного комплекса  $K/K_0$ .

Для определения характера зависимости относительного угла выгорания во второй фазе сгорания от  $K/K_0$  обратимся к рис. 7, где прослеживается четкая линейная аппроксимирующая зависимость, и следовательно формула для аппроксимации параметра  $\varphi_2$  приобретает вид:

$$\varphi_2 = \left( 0,3149 \cdot \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1,6} \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) \left( \frac{V}{V_0} \right) \left( \frac{n_0}{n} \right) + 0,6377 \right) \varphi_{20}$$

С учетом изложенного в качестве основы для численного описания процессов выгорания в газодизеле нами выбрана формула вида

$$\frac{dX}{d\varphi} = \frac{X_1}{\varphi_1} \left( \frac{\varphi}{\varphi_1} \right) \exp \left[ -0,5 \left( \frac{\varphi}{\varphi_1} \right)^2 \right] + \frac{X_2 (k_2 - 1)}{\varphi_2} \left( \frac{\varphi}{\varphi_2} \right)^{k_2 - 1} \cdot \exp \left( - \frac{k_2 - 1}{k_2} \left[ \frac{\varphi_c}{\varphi_2} \right]^2 \right),$$

где  $X_1$  и  $X_2$  – доли теплоты, выделившиеся соответственно в первой и во второй фазе,  $\varphi_c$  – текущее значение угла поворота кривошипа, отсчитываемое от начала сгорания,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы от начала горения до достижения максимальной скорости выгорания соответственно в первой и во второй фазе сгорания. Способы определения этих параметров описаны выше.

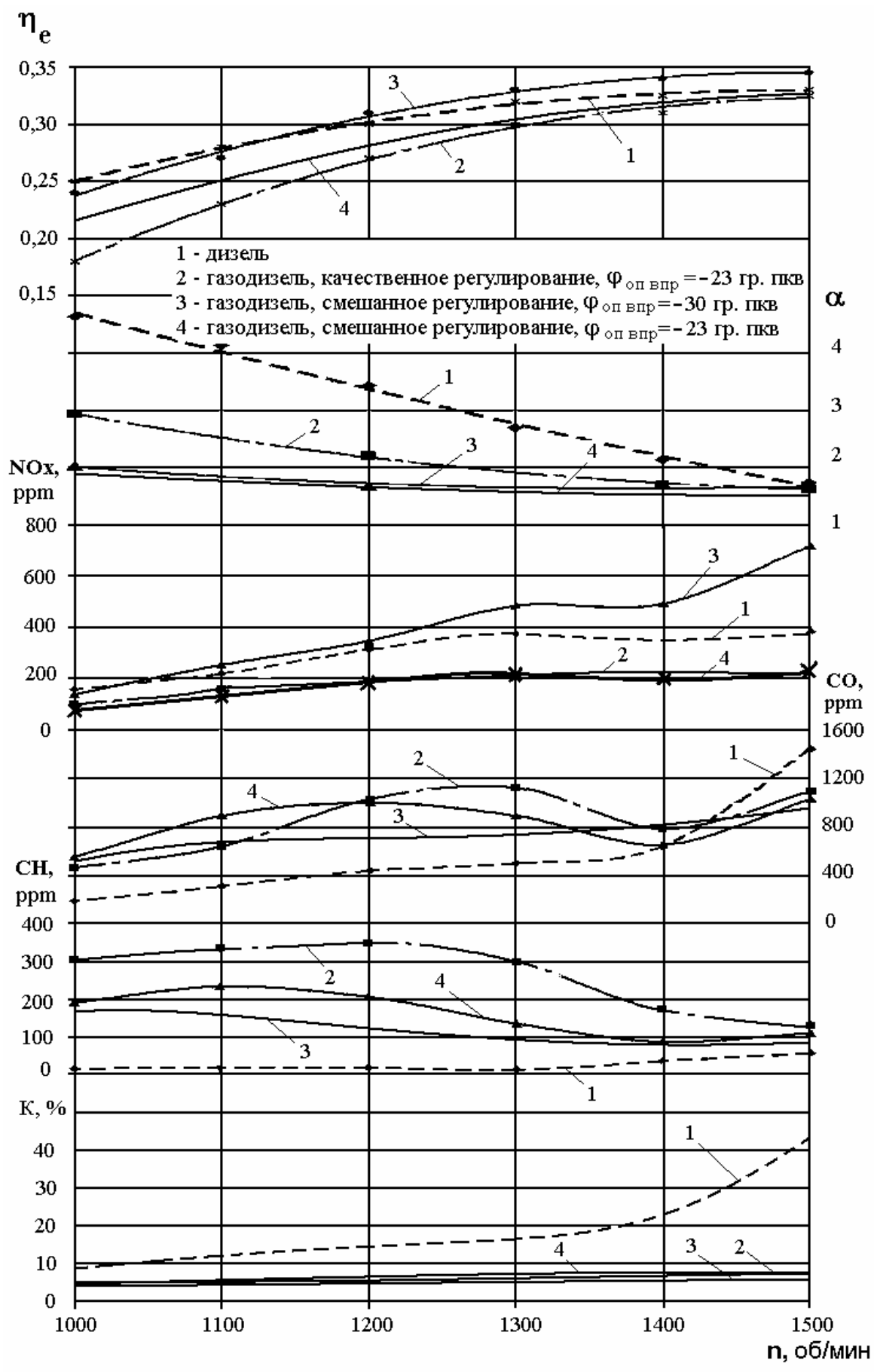


Рис. 8. Винтовая характеристика газодизельного двигателя ЗДб, запальная порция 15%.

На основе полученных результатов сформулирована математическая модель рабочего цикла газодизеля, в которую, наряду с обычными термодинамическими зависимостями, введен ряд формул, представленных выше (в том числе: расчет задержки воспламенения, расчет доли тепла подведенной в первой фазе сгорания, расчет угла достижения максимума скорости тепловыделения во второй фазе сгорания).

Разработанная математическая модель позволила провести ряд расчетов по количественной оценке влияния режимных и регулировочных факторов на выходные показатели двигателя. При выборе запальной дозы в расчетном исследовании учитывались данные эксперимента, по которым минимальное значение составляет 15%. На основании результатов расчета определены рациональные зависимости коэффициента избытка воздуха и угла опережения впрыска при работе газодизеля по винтовой характеристике. Результаты расчетов представлены на рис. 8. Здесь же приведены экспериментальные данные по дымности и токсичности отработавших газов. С точки зрения получения наилучшей экономичности газодизеля преимущество имеет вариант 3, однако выбросы  $\text{NO}_x$  в этом случае больше, чем у дизеля. Поэтому наиболее предпочтительным является вариант 4, при котором достигается эффективный КПД, близкий к дизельному режиму, а выбросы  $\text{NO}_x$  ниже на 20%.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы диссертации.

В результате проведенного исследования, которое включало: анализ схем и конструкций газодизельных двигателей, методов их исследования, существующих данных по рабочему процессу газодизельных двигателей, разработку и создание экспериментальной установки, а также проведение углубленного исследования рабочего процесса газодизельного двигателя ЗДб, можно сделать следующие выводы:

1. Сгорание в газодизеле может быть схематически представлено как совокупность двух параллельно развивающихся процессов - быстрого сгорания испарившейся части запального дизельного топлива и связанной с ней части газового топлива в воздушной среде и распространения фронта турбулентного пламени от очага воспламенения до стенки камеры сгорания.
2. Определяющим параметром для описания первой фазы горения является величина запальной дозы дизельного топлива, для второй - длительность движения фронта пламени, выраженная в углах поворота коленчатого вала.
3. Показано, что длительность движения фронта пламени достаточно полно описывается совокупностью параметров, которые, согласно теории горения, определяют скорость его распространения.
4. Задержка самовоспламенения в газодизеле, при прочих равных условиях, превышает соответствующую величину в дизеле.
5. На основе теоретических положений и результатов эксперимента получено математическое описание процессов воспламенения и сгорания в газодизеле и предложены методы определения основных его параметров.
6. Результаты испытаний на дымность и токсичность отработавших газов показывают значительные преимущества работы по газодизельному циклу:

дымность снижается в 5 – 10 раз, выбросы  $\text{NO}_x$  на 20 – 30%. Однако увеличиваются выбросы  $\text{CH}$ , для снижения которых возможно использовать сравнительно простой окислительный нейтрализатор.

7. На основе полученной математической модели рабочего процесса, с учетом результатов экспериментов по оценке факторов, определяющих токсичность отработавших газов двигателя, определен рациональный закон регулирования судового газодизеля, обеспечивающий обоснованный компромисс между требованиями максимального КПД двигателя и ограничениями, накладываемыми необходимостью минимизации токсичности отработавших газов создаваемого двигателя.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кадхем Н.С., Магидович Л.Е., Новичков М.Ю. Уточнение математической модели рабочего процесса газодизеля. // Тезисы докладов и сообщений. XXVIII Неделя науки СПбГТУ. Ч. I: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000, с. 94-95.
2. Галышев Ю.В., Магидович Л.Е., Новичков М., Фомин Н.Н. The Development And Improvement Of Dual Fuel Engines For Low Sized Motorship. 26th International Scientific Conference On Combustion Engines Kones 2000. September 10 – 13, Naticzow, Poland 2000, vol. 7, p. 108-114.
3. Галышев Ю.В., Новичков М.Ю. Математическое моделирование и расчет рабочего процесса газодизеля. // Тезисы докладов и сообщений. XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч. II: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, с. 6-7.
4. Галышев Ю.В., Новичков М.Ю. Разработка информационно-измерительного комплекса для исследования рабочего процесса газодизельного двигателя. // Тезисы докладов и сообщений. XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч. III: Материалы межвузовской научной конференции СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002, с. 5-7.
5. Галышев Ю.В., Новичков М.Ю., Чай Гоин, Методика экспериментального исследования рабочего процесса газодизеля. // Тезисы докладов и сообщений. XXXI Неделя науки СПбГТУ. Ч. II: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2003, с. 35-36.
6. Галышев Ю.В., Магидович Л.Е., Новичков М.Ю. Горючие газы как перспективное топливо для двигателей городского транспорта (тезисы доклада) Материалы научной конференции «Топливо - двигатель - экологически чистая система, проблемы северо-западного региона» Санкт-Петербург. ГИПХ, 2003.
7. Галышев Ю.В., Магидович Л.Е., Новичков М.Ю. Принципы анализа рабочих процессов газовых двигателей. Двигателестроение №2, 2003 Приложение 1. Материалы всероссийского конгресса двигателестроителей. Санкт-Петербург, 2003.
8. Галышев Ю.В., Магидович Л.Е., Новичков М.Ю. Разработка и исследование судового газодизельного двигателя. Труды международной научно-практической конференции «Безопасность водного транспорта» т.



III, Санкт-Петербург, СПГУВК, 2003

9. Галышев Ю.В., Магидович Л.Е., Новичков М.Ю., Иванов В.М., Задержка самовоспламенения топлива в газодизеле. // Тезисы докладов и сообщений. XXXII неделя науки СПбГПУ. ч. II, Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2004, с. 60-61.