

05.04.02
К18

КОНТРОЛЬНЫЙ
экземпляр

На правах рукописи



Камалудинов Вячеслав Гилимянович

**ОРГАНИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ
ТОПЛИВА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет)

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Драгунов Геннадий Дмитриевич

Официальные оппоненты:

Еникеев Рустэм Далилович, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра «Двигатели внутреннего сгорания», заведующий кафедрой;

Кукис Владимир Самойлович, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет, кафедра «Колесные и гусеничные машины», профессор;

Свистула Андрей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, кафедра «Двигатели внутреннего сгорания», профессор.

Ведущая организация – Российский университет дружбы народов (РУДН).

Защита состоится 30 мая 2012 года, в 13 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», по адресу 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, главный корпус, ауд. 1001.

E-mail: D212.298.09@mail.ru, тел/факс (351)267-91-23

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.298.09.

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Е.А. Лазарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Технико-экономические показатели автотракторных дизелей с существующим способом топливоподачи, смесеобразования и сгорания практически достигли наилучших величин. При этом серьезную конкуренцию для них начинают составлять двигатели, работающие на альтернативных источниках энергии и обладающие лучшими экологическими показателями. В связи с постоянно повышающимися требованиями к токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей транспортных систем приходит понимание того, что только малотоксичный энергоэффективный поршневой двигатель внутреннего сгорания (ПДВС) может быть признан перспективным. Одним из путей улучшения показателей дизелей является снижение неоднородности топливно-воздушной смеси (ТВС) в камере сгорания (КС). В известной мере это уже реализуется применением системы топливоподачи типа Common Rail и применением многофазного впрыска.

Перспективным направлением развития ПДВС может рассматриваться сжигание гомогенных смесей в двигателях с воспламенением от сжатия, например: в двигателях с *HCCI* процессом стремятся сочетать достоинства ПДВС с искровым зажиганием, работающих на бензине, и дизелей.

На определенном этапе достижения гомогенизации ТВС начинают появляться новые проблемы, связанные с организацией эффективного сгорания гомогенных смесей широкого качественного состава, которые в настоящее время не получили полного и эффективного решения.

Поэтому проблема организации эффективного процесса сгорания топлива в гомогенных смесях широкого качественного состава является актуальной, и ее решению посвящено данное исследование.

На основании вышеизложенного сформулирована научная **проблема**: отсутствие научно обоснованных методов организации эффективного рабочего процесса для создания перспективных поршневых двигателей с воспламенением от сжатия, работающих на гомогенных топливно-воздушных смесях широкого качественного состава.

Объектом исследования является рабочий процесс перспективного ПДВС с воспламенением от сжатия и плазменно-факельным зажиганием (ПФЗ) гомогенной горючей смеси и пониженной токсичностью ОГ по содержанию оксидов азота.

Предметом исследования являются процессы воспламенения и сгорания углеводородного топлива различного состава в перспективном двигателе с воспламенением от сжатия и ПФЗ, сопровождаемые процессами тепло- и массообмена, тепловыделения от сгорания и теплопоглощения при диссоциации диоксида углерода.

Целью исследования является развитие теории и методологии представления и организации эффективного процесса сгорания топлива в гомогенных смесях широкого качественного состава с наименьшим образованием оксидов азота для перспективного поршневого двигателя с воспламенением от сжатия и ПФЗ.

Гипотеза. Рациональное для различных режимов работы ПДВС сочетание процессов самовоспламенения от сжатия и принудительного ПФЗ повысит эффективность процесса сгорания гомогенных смесей широкого качественного состава. Это позволит решить проблему организации эффективного рабочего процесса ПДВС с низким содержанием оксидов азота в ОГ.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Проанализировать проблемы организации рабочего процесса в двигателях с воспламенением от сжатия, определяющие надежность воспламенения и эффективность сгорания.

2. Разработать прикладную теорию объемного горения гомогенной ТВС применительно к самовоспламенению от сжатия и принудительному ПФЗ, а также методологию моделирования эффективного процесса сгорания смесей широкого качественного состава для перспективного ПДВС.

3. Разработать методику исследования для выявления закономерностей эффективного процесса сгорания топлива в гомогенных смесях широкого качественного состава в условиях двигателя с воспламенением от сжатия.

4. На основе выявленных закономерностей теоретически и расчетом обосновать способы улучшения показателей рабочего процесса с наименьшим образованием вредных веществ для перспективного двигателя с воспламенением от сжатия и ПФЗ.

5. Подтвердить экспериментально выявленные закономерности развития процесса сгорания топлива и эффективность предлагаемых способов улучшения воспламенения и сгорания на моделях двигателя с воспламенением от сжатия и ПФЗ, в том числе при холодном пуске дизеля.

6. Разработать рекомендации по организации эффективного процесса сгорания топлива в гомогенных смесях широкого качественного состава и методику выбора параметров перспективного двигателя с воспламенением от сжатия и ПФЗ.

Методологические основы исследования

1. Основные законы химической кинетики, молекулярной физики, термодинамики, теплофизики и теории рабочих процессов ПДВС, положенные в основу комплексной модели процесса сгорания.

2. Накопленный мировой опыт управления рабочим процессом в бензиновых двигателях с искровым зажиганием и дизелях.

В диссертационном исследовании использовались оправдавшие себя методы научного познания, применяемые как при теоретических, так и при экспериментальных исследованиях.

В диссертационном исследовании использовался системный подход к изучению внутрцилиндровых процессов в ПДВС, представляющий собой системно-структурный анализ многообразия внутренних связей и количественных соотношений параметров, процессов и факторов, формирующих рабочий процесс и определяющих своевременность воспламенения и эффективность сгорания топлива.

На защиту выносятся следующие результаты, обладающие **научной новизной**:

1. Комплексная модель объемного сгорания топлива в гомогенных смесях широкого качественного состава, описывающая 5 процессов: 1 – процесс объемного горения однородной ТВС, содержащей продукты сгорания; 2 – процесс сгорания двухкомпонентного топлива; 3 – процесс диссоциации диоксида углерода, образующегося при сгорании топлива; 4 – процессы сжатия и расширения в цилиндре ПДВС рабочего тела переменной массы; 5 – процессы формирования и развития первичного очага горения, образованного высокоэнергетическим плазменным факелом.

2. Система новых уравнений, участвующих в описании 5 процессов: условной продолжительности окисления активных молекул топлива; коэффициента реакционной активности кислорода, учитывающего влияние инертных компонентов рабочего тела; давления в цилиндре ПДВС рабочего тела переменной массы в процессах сжатия и расширения; распределения общего кислорода воздуха между каждым компонентом двухкомпонентного топлива; степени диссоциации диоксида углерода; изменения энергии активации топлива в процессе сгорания; величины ограниченного объема ТВС, охватываемого плазменным факелом; толщины фронта пламени при развитии первоначального очага.

3. Закономерности развития процесса сгорания и изменения индикаторных показателей рабочего цикла при самовоспламенении и ПФЗ различных воздушных смесей дизельного топлива, диметилового эфира (ДМЭ), природного газа (ПГ), и двухтопливных смесей (ДМЭ и ПГ) в зависимости от термодинамических, теплофизических и физико-химических параметров горючей смеси, а также от параметров плазменного факела.

4. Практические методы организации эффективного процесса сгорания топлива с наименьшим образованием оксидов азота, состоящие в использовании гомогенной ТВС широкого качественного состава (ДМЭ и ПГ). Объемное ее самовоспламенение в требуемый момент времени в зависимости от режима работы необходимо обеспечивать оперативным регулированием термодинамических параметров и состава рабочего тела на впуске. На критических режимах работы двигателя для стабилизации воспламенения целесообразно применять ПФЗ.

Достоверность научных положений подтверждена качественным и количественным совпадением результатов расчетных исследований с экспериментальными данными автора и других исследователей в широком диапазоне качественного состава ТВС, теплового и скоростного режимов работы двигателей с воспламенением от сжатия и ПФЗ на различных топливах и их смесях.

Практическую значимость работы составляют следующие результаты.

1. Программы расчета рабочего цикла двигателя с воспламенением от сжатия, позволяющие ускорить и удешевить процесс разработки и доводки варианта перспективного малотоксичного двигателя 4ЧН13/15 при работе

его на гомогенной воздушной смеси ДМЭ и ПГ, а также доводки факельных подогревателей свежего заряда для облегчения холодного пуска дизелей типа В-2 и 2В.

2. Рекомендации по режимам работы факельных подогревателей для дизелей типа В-2 и 2В при снижении геометрической степени сжатия ϵ_r до 12 единиц;

3. Способ ПФЗ, обеспечивающий эффективное сгорание топлива на экстремальных режимах работы двигателя с воспламенением от сжатия, например: при холодном пуске дизеля 12ЧН15/18 ($\epsilon_r=12$) при температурах до минус 28°C.

Рекомендации работы используются в ГСКБ «Трансдизель» ООО «ЧТЗ-Уралтрак» при доводке рабочих процессов серийных и новых двигателей, а также при выборе параметров и доводке факельных подогревателей впускного воздуха дизелей типа В-2 и 2В. Разработанный способ ПФЗ принят в качестве перспективного варианта системы облегчения пуска дизелей типа 2В (ЧН15/16) при низких температурах окружающей среды.

Реализация результатов работы. Результаты исследования использованы при выполнении НИР по грантам РФФИ-Урал (2007-2008 гг.), федерального агентства по образованию Минобрнауки РФ (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы), по тематическому плану Минобрнауки РФ (2008-2009 гг.) и в работах ГСКБ «Трансдизель» по перспективным двигателям. Программы расчета используются в учебном процессе и НИРС кафедры ДВС ЮУрГУ.

Апробация работы. Основное содержание работы доложено, обсуждено и одобрено в НИИД, г. Москва, 1985, 1989 гг.; ВНИИТМ, г. Ленинград, 1989-91 гг., в ГСКБ «Трансдизель» «ООО ЧТЗ», г. Челябинск, 1985-88 гг., в ЧПИ, г. Челябинск, 1981-1988 гг., в ЮУрГУ, г. Челябинск, 1996-2011 гг., в УАИ, г. Уфа, 1990 г., в МГТУ «МАМИ», г. Москва, 2005 г.; в МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011 г.; на МНТК в ЮУрГУ, г. Челябинск, 2006 г., в ЧГАУ, г. Челябинск, 2008 г. и в МГТУ им. Баумана, г. Москва, 2010 г.; на ВНТС в МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009-2011 гг.; на МНТК JSAE в г. Киото (Япония), 2011 г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 47 печатных работах, в том числе 35 статей (17 статей из Перечня ВАК), 6 тезисов докладов, 2 отчета о НИР, зарегистрировано 3 программы расчета и одно изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем 298 страниц, имеется 101 рисунок, 6 таблиц, список литературы из 271 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведен методологический аппарат диссертационного исследования.

В главе 1 приведен краткий анализ существующих представлений о процессе сгорания гомогенных и гетерогенных ТВС широкого качествен-

ного состава в двигателях с воспламенением от сжатия и моделей его описания. Сформулированы требования к перспективному ПДВС с низкими выбросами оксидов азота. Показано, что существующие методы организации процесса сгорания в ПДВС не позволяют в полной мере решать проблемы, связанные с организацией эффективного сгорания гомогенных смесей широкого качественного состава. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

В главе 2 представлена разработанная комплексная модель объемного сгорания топлива в гомогенных смесях широкого качественного состава при самовоспламенении и принудительном ПФЗ, включающая следующие подмодели.

Подмодель процесса объемного горения однородной ТВС, содержащей продукты сгорания учитывает следующие отличия от существующих.

1. Весь процесс сгорания рассматривается как объемная реакция окисления до диоксида углерода и воды активных молекул топлива, имеющих энергию, больше условной энергии активации при данной температуре.

2. Количество активных молекул топлива зависит от общего количества молекул топлива, текущей температуры смеси и условной энергии активации, изменяющейся в зависимости от доли выгоревшего топлива.

3. Введено понятие *условной продолжительности окисления* активных молекул топлива, зависящее от общего количества молекул топлива, объема КС, количества молекул кислорода и инертных компонентов и турбулентности внутри КС.

4. Введено понятие коэффициента реакционной активности кислорода, с помощью которого учитывается влияние на скорость сгорания инертных компонентов горючей смеси (азота, диоксида углерода, воды, оксида углерода и др.).

При исследовании любого процесса, протекающего во времени, применяется временной параметр, с помощью которого отслеживается изменение изучаемого явления. В ПДВС роль временного фактора играет угол поворота коленчатого вала (при допущении равномерного вращения коленчатого вала двигателя) измеряемый в градусах его поворота. Но при исследовании процесса сгорания, когда угол поворота привязан не только ко времени, но и величине объема сжатия, эта подмена не всегда корректна. Изменение объема сжатия однозначно приводит к изменению температуры в цилиндре и концентрации реагирующих веществ и, следовательно, скорости реакции окисления. В этом случае не представляется возможным однозначно определить причину изменения скорости сгорания: либо это происходит в результате изменения температуры и концентрации, либо – просто с течением времени. Новый параметр устраняет этот недостаток, так как в явном виде учитывает количество молекул всех компонентов рабочего тела и величину объема сжатия.

Выражение для определения условной продолжительности реакции окисления активных молекул топлива получено в виде:

$$\tau_v = \frac{Z_T}{const \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot V \cdot C_T^p \cdot C_{O_2}^q} = \frac{V}{const \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Z_T^{p-1} \cdot Z_{O_2}^q}, \quad (1)$$

где Z_T – общее количество молекул топлива в рассматриваемом объеме V цилиндра двигателя; $const$ – константа, учитывающая количество активных соударений молекул реагирующих веществ в единицу времени в единице объема; K_1 – коэффициент реакционной активности кислорода, учитывающий влияние инертных составляющих рабочего тела (азота и продуктов сгорания); K_2 – коэффициент, учитывающий турбулентность внутри КС, $K_2 \geq 1$; $C_T = Z_T/V$ и $C_{O_2} = Z_{O_2}/V$ – концентрации всех молекул топлива Z_T и кислорода Z_{O_2} в объеме V соответственно; p, q – показатели степени, причём $p+q=n$ – кинетический порядок реакции, $n=2$;

Коэффициент K_1 предложено определять по новой эмпирической формуле, описывающей экспериментальную зависимость относительной величины периода задержки воспламенения (ПЗВ) топлива $\tau_{зв}$ от массовой доли кислорода в окислителе в смеси с азотом ψ , приведенную Дубовкиным Н.Ф. для оценки влияния инертных газов на ПЗВ топлива (рис. 1):

$$K_1 = 1 - \left(1 - \frac{Z_{O_2}}{Z_{O_2} + Z_{N_2} + Z_{CO_2} + Z_{H_2O} + Z_{CO}}\right)^6, \quad (2)$$

где $Z_{N_2}, Z_{CO_2}, Z_{H_2O}$ и Z_{CO} – количества молекул азота, диоксида углерода, воды и оксида углерода в расчетном объеме V соответственно.

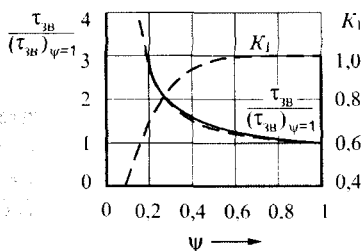


Рис. 1. Зависимость относительной величины периода задержки воспламенения и коэффициента реакционной активности кислорода от массовой доли кислорода в окислителе ψ : пунктирные линии – расчет по модели для дизельного топлива, сплошная линия – эксперимент

вместо интервала времени dt – условия продолжительность реакции окисления активных молекул топлива τ . Мгновенная скорость окисления

принимается по общепринятому выражению $w = const \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot C_T^p \cdot C_{O_2}^q$.

Энергия активации для каждого топлива определяется на основании обработки экспериментальных данных по моменту воспламенения и ха-

Коэффициент K_2 введен для возможности моделирования (при необходимости) влияния движения горючей смеси. При моделировании сгорания гомогенной смеси можно принимать $K_2=1$.

Выражение (1) получено из общего уравнения скорости химической

реакции $w = \frac{1}{V} \cdot \frac{dN}{dt}$. Для этого вместо

изменения количества вещества dN использовано количество активных молекул топлива (согласно закону

Аррениуса) $Z_E = Z_T \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$, энергия E_a которых выше энергии активации, а

которые выше энергии активации, а

которые выше энергии активации, а

рактеристике тепловыделения при известных параметрах горючей смеси в начале сжатия и условиях сжатия. Для моделирования изменения кинетики окисления топлива в процессе сгорания получено уравнение текущего значения энергии активации: $E_a = E_{an} + (E_{ak} - E_{an}) \cdot x^n$, (3)

где E_{an} , E_{ak} – энергии активации в начале и конце сгорания, x – доля выгоревшего топлива, n – показатель степени.

Подмодель процесса сгорания двухкомпонентного топлива (например: метана и ДМЭ) включает новый подход, основанный на предположении, что вокруг молекул каждого вида топлива находятся и, соответственно, могут реагировать только конкретные молекулы кислорода. Совокупность объемов вокруг молекул одного вида топлива, в котором находятся эти молекулы кислорода и соответствующее количество молекул инертных компонентов, образуют один условный объем. А совокупность объемов вокруг молекул второго вида топлива, соответственно – второй условный объем. Давление и температура смеси в этих объемах имеют одинаковые значения и изменяются одновременно в зависимости от изменения объема, теплоотдачи в стенку цилиндра и тепловыделения при сгорании топлив по законам термодинамики. Процесс сгорания каждого из топлив описывается по приведенной выше подмодели процесса горения. Теплота, выделяющаяся при сгорании каждого из топлив, суммируется на шаге расчета и расходуется на изменение внутренней энергии всего рабочего тела в цилиндре и совершение им работы.

Разделение общего объема смеси производится пропорционально количеству молекул каждого компонента топлива по следующим выражениям:

$$V_{DMЭ} = \frac{Z_{DMЭ}}{Z_{DMЭ} + Z_{CH4}} \cdot V; \quad V_{CH4} = \frac{Z_{CH4}}{Z_{DMЭ} + Z_{DMЭ}} \cdot V. \quad (4)$$

Общий кислород воздуха Z_{O_2} , находящийся в объеме V , распределяется для каждого из объемов в той же пропорции, что и общий объем: на $Z_{O_2DMЭ}$ для сгорания ДМЭ и Z_{O_2CH4} для сгорания метана:

$$Z_{O_2DMЭ} = Z_{O_2} \cdot \frac{Z_{DMЭ}}{Z_{DMЭ} + Z_{CH4}}; \quad Z_{O_2CH4} = Z_{O_2} \cdot \frac{Z_{CH4}}{Z_{DMЭ} + Z_{CH4}}. \quad (5)$$

Правомочность применения нового подхода проверена численным экспериментом при условном разделении топлива одного вида на два объема в разных пропорциях.

Подмодель процессов сжатия и расширения включает новое аналитическое уравнение, описывающее изменение давления в цилиндре рабочего тела переменной массы в условиях нестационарного тепло- и массо-

обмена:
$$dp = \frac{dQ_{cr} - dQ_{m.o.} - dQ_{onc.}}{m} - p dv \frac{k}{k-1} - (i - i_{sm}) \frac{dm_{sm}}{m}, \quad (6)$$

где dQ_{cr} , $dQ_{m.o.}$, $dQ_{onc.}$ – теплоты, выделившаяся при сгорании топлива, отведенная от рабочего тела (теплообмен со стенками, при нагреве и испаре-

нии топлива и другие) и расходуемая на диссоциацию продуктов сгорания, соответственно; p , v и dv – давление, удельный объем рабочего тела в цилиндре и его изменение, соответственно; $k=C_p/C_v$ – показатель адиабаты; i , i_{en} – удельные энтальпии рабочего тела, находящегося в цилиндре, массой m и дополнительно входящего компонента массой dm_{en} .

В уравнении (6) кроме общепринятых процессов (тепловыделение и теплообмен со стенками, изменение объема цилиндра) учитываются утечки через цилиндропоршневой зазор и подача дополнительного рабочего тела, например: при воздухопуске, применении плазмотрона или подаче газообразного топлива, а также затраты энергии на нагрев и испарение топлива и диссоциацию диоксида углерода.

Для вычисления давления в конце элементарного участка рабочего цикла с началом в т.1 и окончанием в т.2 уравнение (6) преобразовано (при допущении однородности рабочего тела и малости шага расчета) к виду:

$$p_2 = \frac{\frac{4(\Delta Q_{c.v.1-2} - \Delta Q_{m.o.1-2} - \Delta Q_{дис.1-2})}{m_1 + m_2} + p_1(v_1 \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1} - v_2) + \frac{2(i_{en1} + i_{en2} - i_1 - i_2)\Delta m_{en1-2}}{m_1 + m_2}}{v_2(k_{1-2} + 1)/(k_{1-2} - 1) - v_1}. \quad (7)$$

Если исключить дополнительную подачу рабочего тела в цилиндр двигателя ($\Delta m_{en1-2}=0$) и прорыв газов из него ($m_1=m_2$), то уравнение (7) преобразуется в частном случае к виду, полученному проф. И.И. Вибе для расчета давления в процессе сгорания при постоянной массе рабочего тела.

Теплоотдача в стенки цилиндров за шаг расчета определялась по закону Ньютона-Рихмана. Мольные теплоемкости, необходимые для уточненного определения показателя адиабаты и температуры в зоне горения, задавались для каждого компонента рабочего тела в функции температуры по рекомендациям А.А. Равделя.

Температура рабочего тела в процессах сжатия-расширения определяется с помощью известного уравнения состояния газов $T = pV/(mR)$.

Подмодель процесса диссоциации диоксида углерода включает уравнения для определения степени диссоциации при условии квазиравновесного состояния по рекомендациям В.В. Померанцева, количества молекул диоксида углерода, распавшихся на оксид углерода и кислород, а также затрат энергии на этот процесс. При снижении температуры в зоне горения принимается, что процесс диссоциации идет в обратную сторону с выделением теплоты за счет окисления оксида углерода.

Количество молекул диоксида углерода dZ_{CO_2} , распавшихся за шаг расчета, определяется через степень диссоциации α_o при текущих давлениях, температурах и составе рабочего тела.

Степень диссоциации α_o вычислялась при решении кубического уравнения $\alpha_o^3 + \alpha_o^2 \frac{2\beta}{1 - K_p^2 p} + \alpha_o \frac{(-3 - 4\beta)}{1 - K_p^2 p} + \frac{2 + 2\beta}{1 - K_p^2 p} = 0$.

(8)

Здесь p – давление в цилиндре; K_p – константа равновесия реакции, определяется из выражения $\lg K_p^2 = \frac{29791}{T} + 0,169 \cdot 10^{-3} T - \frac{0,324 \cdot 10^5}{T^2} - 9,495$, рекомендованному А.А. Равделем; β – отношение суммы молей азота N_{N_2} и воды N_{H_2O} к числу молей диоксида углерода N_{CO_2} в рабочем теле в начале шага расчета: $\beta = (N_{N_2} + N_{H_2O}) / N_{CO_2}$.

Затраты энергии на диссоциацию этих молекул определялись по выражению $dQ_d = dZ_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2} \cdot A_0 \cdot E_d$, (9)

где μ_{CO_2} – молекулярная масса диоксида углерода; E_d – энергия, затрачиваемая на диссоциацию диоксида углерода.

Подмодель процессов формирования и развития очага горения, образованного высокоэнергетическим плазменным факелом, включает следующие уравнения для определения:

– доли цикловой подачи топлива, которую необходимо охватить плазменным факелом, в зависимости от параметров ТВС в момент электроразряда: $\delta_u = K_K C_{CM} T_{CM} / H_{CM}$, (10)

где $K_K = \frac{K_1 \cdot \alpha \cdot L_0}{K_2 \cdot (1 + \alpha \cdot L_0)}$ – коэффициент, учитывающий влияние качества

смесеобразования на процесс окисления топлива в ПЗВ;

– величины объема ТВС, содержащей расчетное количество топлива: $V_{OFP} = \delta_u \cdot V_\phi / K_r$, (11)

где V_ϕ – суммарный объем топливных факелов, K_r – коэффициент, учитывающий часть цикловой подачи топлива, находящуюся в распыленном состоянии в момент электроразряда;

– затрат энергии на основные процессы подготовки смеси, происходящие в плазменном факеле;

– температуры в плазменном факеле, необходимой для подготовки к окислению требуемого количества топлива m_{T_3} за n_1 актов реакции:

$$T_{пл} = E / (R \cdot \ln(n_1 \cdot m_{T.пл} / m_{T_3}));$$

– размеров очага горения и степени подогрева близлежащего объема свежей смеси.

В главе 3 приведено моделирование процессов самовоспламенения и сгорания гомогенных ТВС в условиях КС постоянного объема и реального двигателя типа В-2, 2В и серии «Г» ООО «ЧТЗ-Уралтрак». Оно выполнялось с помощью программных продуктов, в основу которых положены методики, включающие новые авторские уравнения (1...9). Одновременно производилась **верификация моделей** путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными автора и других исследователей.

Подмодель процессов сжатия и расширения рабочего тела проверялась сопоставлением результатов расчетов давления в цилиндре дизелей 1415/16 ($\epsilon_r=8$) и 12ЧН15/18 с экспериментальными данными автора при

постоянной и переменной частотах вращения коленчатого вала n в широком диапазоне (от 10 до 2000 мин^{-1}). Расчетные величины давлений на рис. 2 при прокрутках коленчатого вала без подачи топлива с постоянной частотой $n=40 \text{ мин}^{-1}$ и 100 мин^{-1} и температурах двигателя $T_w=282 \text{ К}$ и 332 К отличаются от экспериментальных не более 0,2 %. Это подтверждает достоверность математического моделирования процессов тепло- и массообмена с помощью уравнений (6) и (8) на режимах пуска дизеля, отличающихся повышенными утечками рабочего тела и чувствительностью к тепловым потокам в цилиндре. Следовательно, расчетные значения средних температур рабочего тела в цилиндре соответствуют реальным.

Небольшое отличие величин давлений на рис. 3 (менее 0,5 МПа, что составляет менее 2,5 %) вызвано тем, что в расчете не учитывались затраты энергии на нагрев и испарение впрыскиваемого в цилиндр топлива после начала впрыска (20 град. п.к.в. до ВМТ), а также возможные предпламенные процессы. Это доказывает, что при переменной частоте вращения n , и нестационарном тепло- и массообмене уравнениями (6) и (8) можно также моделировать тепловое состояние рабочего тела в цилиндре с точностью до 2,5 %.

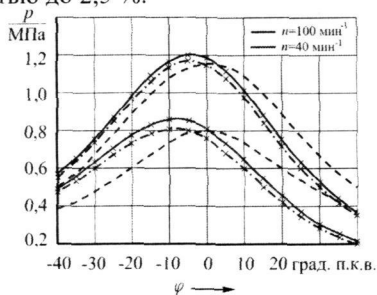


Рис. 2. Изменение давления в цилиндре дизеля 1Ч15/16 ($\epsilon_r=8$):

- расчет при $T_w=332 \text{ К}$;
- · - · - расчет при $T_w=282 \text{ К}$;
- - - - - расчет по политропе;
- х — экспериментальные точки

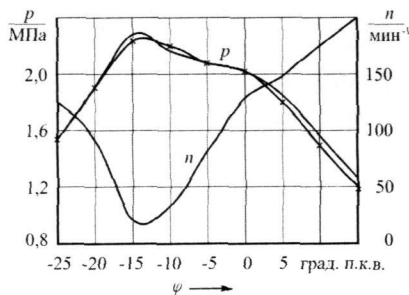


Рис. 3. Изменение давления в цилиндре дизеля 12Ч15/18 ($\epsilon_r=14,5$) при переменной частоте вращения коленчатого вала:

- расчет;
- х — эксперимент

Подмодель процесса сгорания в частном случае может быть использована для определения продолжительности периода задержки воспламенения. Это подтверждается сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными проф. Свиридова Ю.Б., полученными при впрыске дизельного топлива в КС постоянного объема при противодавлении 2,3 МПа при различных температурах сжатого воздуха (рис. 4). В диапазоне температур от 570 К до 700 К, когда физическая составляющая задержки воспламенения в меньшей мере сказывается на общем периоде, различия в $\lg \tau_{зв}$ составляют менее 5 %.

Адекватность подмодели процесса диссоциации диоксида углерода проверена сопоставлением зависимости от температуры расчетной степени

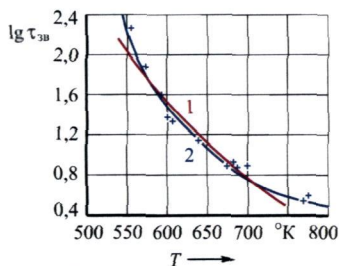


Рис. 4. Температурная зависимость задержки воспламенения при впрыске дизельного топлива: 1 – расчет; 2 – эксперимент; + – опытные данные проф. Свиридова Ю.Б.

диссоциации с данными проф. Померанцева В.В. при уровне давления, характерного для ПДВС (рис. 5).

Принимая во внимание возможное увеличение степени диссоциации от наличия в смеси инертных компонентов (азота и продуктов сгорания), можно утверждать, что изменение расчетной степени диссоциации диоксида углерода для условий сгорания метано-воздушной смеси согласуется с известными данными с точностью до 20 %.

Важность учета степени диссоциации диоксида углерода при сгорании смесей с коэффициентом избытка воздуха менее 2,5 показывает рис. 6. Здесь видно, что при максимальных температурах сгорания T_{\max} более 2000 К степень диссоциации $\alpha_d > 0,01$. Если не учитывать диссоциацию диоксида углерода, то прирост максимальной температуры ΔT_{\max} при сгорании воздушной смеси метана при $\alpha = 1$ может достигать 290 К, а при сгорании ДМЭ – до 170 К. В результате завышения расчетной температуры и, соответственно, давления может быть получена ошибка в индикаторных показателях рабочего цикла ПДВС в сторону их улучшения и искажена зависимость образования оксидов азота от максимальной температуры сгорания.

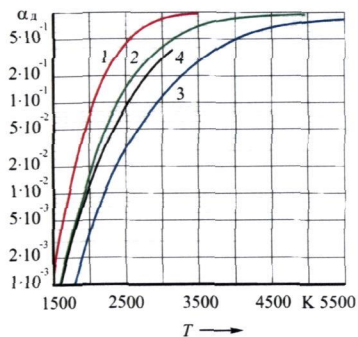


Рис. 5. Зависимость равновесной степени диссоциации диоксида углерода от температуры и давления: 1 – $p=0,01$ бар; 2 – $p=1$ бар; 3 – $p=100$ бар без азота в окислителе; 4 – расчет при сгорании метано-воздушной смеси при повышении давления от 31,8 бар до 62,8 бар

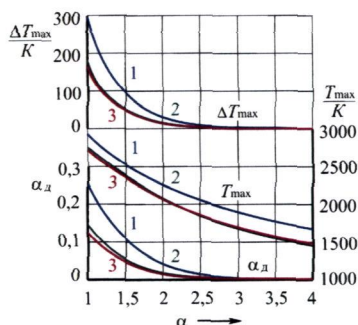


Рис. 6. Влияние качественного состава воздушных смесей метана (1), ДМЭ (2) и дизельного топлива (3) на параметры процесса сгорания в КС постоянного объема: 1 – $p = 1,5$ МПа, $T = 900$ К, $\gamma_{\text{ост}} = 0$; 2 и 3 – $p = 1,5$ МПа, $T = 700$ К, $\gamma_{\text{ост}} = 0$

Подмодели процессов объемного горения топлива и сжатия-расширения рабочего тела отработаны на дизеле 1415/16 ($\epsilon_r=8$) при самовоспламенении и сгорании дизельного топлива при постоянной $n=100$ мин⁻¹. Сопоставление результатов расчетов давления в цилиндре с экспериментальными данными автора при моделировании рабочего цикла с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия приведено на рис. 7 и 8.

В экспериментах дополнительно к основному топливу, впрыскиваемому в цилиндр, подавалось мелко распыленное дизельное топливо во впускной коллектор, моделируя внешнее смесеобразование, с одновременным подогревом свежего заряда за счет сжигания бензина. Вследствие этого подогретый свежий заряд помимо топлива содержал уменьшенное количество кислорода и повышенное количество продуктов сгорания, что сказывалось на динамике изменения давления рабочего тела в цилиндре дизеля.

При подаче на впуск от $0,077 \cdot 10^{-3}$ кг/цикл топлива (рис. 7) и выше (рис. 8) коэффициент избытка воздуха для внешнего смесеобразования составлял от 1,53 при малом подогреве ($\Delta T_{вп}=45 \dots 50$ К) до 0,37 при высокой степени подогрева ($\Delta T_{вп} \geq 127$ К). В результате это топливо воспламенялось до начала подачи серийной форсункой (10 град. п.к.в. до ВМТ).

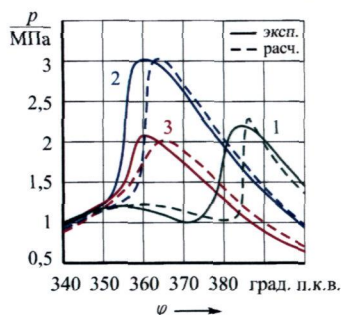


Рис. 7. Влияние температуры подогрева свежего заряда на диаграмму давления в цилиндре: 1 – $\Delta T_{вп}=45$ К, $\alpha=1,53$; 2 – $\Delta T_{вп}=80$ К, $\alpha=1,19$; 3 – $\Delta T_{вп}=127$ К, $\alpha=0,77$

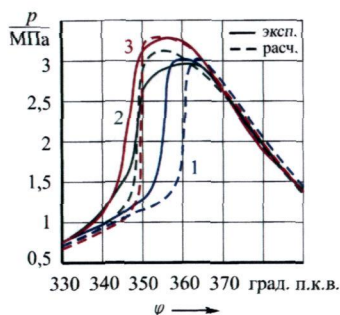


Рис. 8. Влияние подачи топлива на впуске на диаграмму давления в цилиндре, $\Delta T_{вп}=80 \dots 100$ К: 1 – $q_{ц доп}=0,077 \cdot 10^{-3}$ кг/цикл; 2 – $q_{ц доп}=0,14 \cdot 10^{-3}$ кг/цикл; 3 – $q_{ц доп}=0,206 \cdot 10^{-3}$ кг/цикл

Несмотря на неустановившиеся режимы работы дизеля, расчетные максимальные давления в цилиндре p_{max} отличаются от экспериментальных, как правило, не более 5 %, а углы максимальной скорости тепловыделения – не более 5 град. п.к.в. Приведенные результаты подтверждают правомочность применения разработанной модели для расчетов процесса сгорания дизельного топлива в широком диапазоне изменения температуры и состава горючей смеси и режимов работы двигателя.

Адекватность моделей при работе на смесевом топливе проверена сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными японским ученым Zhili Chen с коллегами при исследованиях НСЦИ двигателя Yanmar Co. Ltd (диаметр цилиндра 0,092 м, ход поршня

0,096 м, $\epsilon_r=17,7$) при $n=960 \text{ мин}^{-1}$ при различном составе двухкомпонентного топлива. Коэффициенты избытка воздуха ($\alpha_{\text{ДМЭ}}, \alpha_{\text{ПГ}}$) и количества молекул ($Z_{\text{ДМЭ}}, Z_{\text{ПГ}}$) ДМЭ и ПГ на исследованных режимах приведены в таблице 1. На рис. 9 видно, что расчетные максимальные давления в цилиндре двигателя отличаются от экспериментальных не более 2,5 %, а углы максимальной скорости тепловыделения – менее 2 град. п.к.в. в исследованном диапазоне изменения состава смеси.

При анализе влияния состава двухкомпонентного топлива на процесс сгорания установлено, что метан оказывает флегматизирующее влияние на ДМЭ. Оно проявляется в том, что его присутствие снижает способность к самовоспламенению ДМЭ. В новой модели сгорания топлива это влияние учитывается через увеличение условной начальной энергии активации ДМЭ ($E_{\text{АН ДМЭ}}$) при повышении содержания метана в смесевом топливе.

Таблица 1. Параметры ТВС на различных режимах испытания ПДВС с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия

№ режима	$\alpha_{\text{ДМЭ}}$	$\alpha_{\text{ПГ}}$	$Z_{\text{ДМЭ}} \cdot 10^{-20}$	$Z_{\text{ПГ}} \cdot 10^{-20}$	$Z_{\text{ПГ}}/Z_{\text{ДМЭ}}$
1	6,5	7,1	1,48	2,08	1,41
2	10,3	7,1	0,946	2,11	2,23
3	14,7	7,1	0,666	2,12	3,18
4	11,9	4,0	0,796	3,64	4,57
5	14,3	4,0	0,662	3,64	5,50
6	15,5	4,0	0,610	3,64	5,97

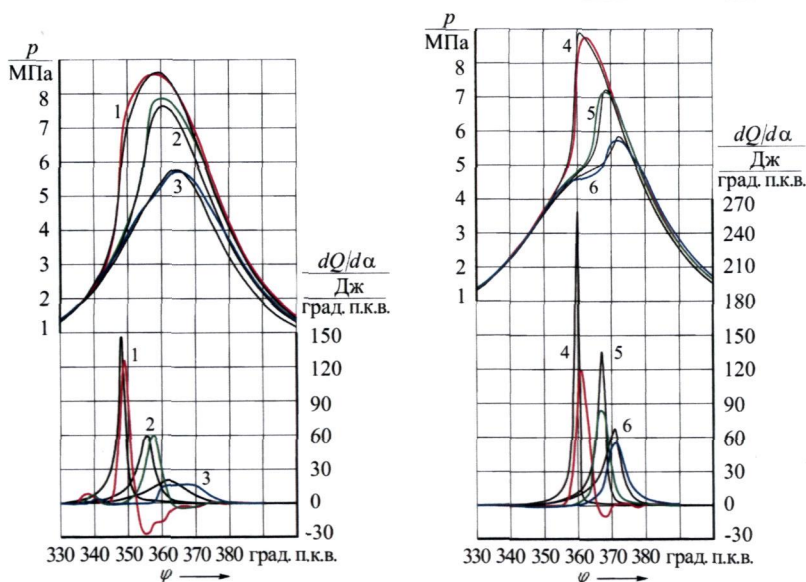


Рис. 9. Диаграммы давлений и скоростей тепловыделения в цилиндре на режимах таблицы 1: цветные графики – эксперимент, черные – расчет

В результате расчетных исследований определена зависимость $E_{\text{АН ДМЭ}}$ от соотношения количеств молекул ПГ и ДМЭ и от массовой доли ДМЭ ($\varphi_{\text{ДМЭ}}$) в смесевом топливе, приведенная на рис. 10.

С помощью разработанной модели выполнены расчетные исследования процессов самовоспламенения и сгорания гомогенной воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема при $p=1,5$ МПа и $T=700$ К. На рис. 11 приведено расчетное изменение состава воздушной смеси ДМЭ в процессе сгорания при отсутствии остаточных газов. Здесь видно, что количество молекул кислорода Z_{O_2} за 1 мс уменьшается в $\sim 1,71$ раза. В тоже время количество молекул инертных компонентов увеличивается на большую величину частично за счет диоксида углерода (Z_{CO_2}) и частично за счет воды ($Z_{\text{H}_2\text{O}}$). С учетом первоначального количества молекул азота и аргона увеличение составляет 19%.

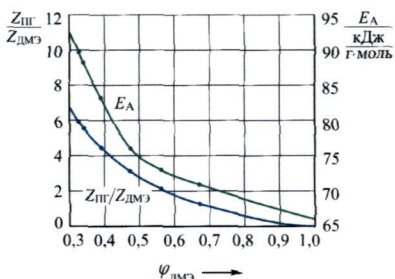


Рис. 10. Зависимость $E_{\text{АН ДМЭ}}$ и соотношения количеств молекул ПГ и ДМЭ от массовой доли ДМЭ в смесевом топливе

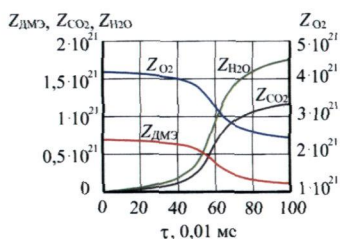


Рис. 11. Изменение состава смеси при сгорании ДМЭ в КС постоянного объема: $\alpha_b=2,0$, $p=1,5$ МПа, $T=700$ К, $\gamma_{\text{ост}}=0$, $K_1=\text{var}$

По результатам расчетов скорости сгорания построены графики при различных значениях коэффициента остаточных газов (рис. 12,а). В случае исключения влияния инертных компонентов на условную продолжительность реакции окисления τ_y ($K_1=1$) максимальные значения скорости сгорания и моменты ее достижения изменяются незначительно (пунктирные линии на рис. 12,а). А при одновременном учете влияния реагирующих и инертных компонентов с помощью коэффициента K_1 выявлено существенное замедление процесса сгорания (сплошные линии на рис. 12,а).

В случае отсутствия остаточных газов расчетная максимальная скорость сгорания уменьшилась в 1,59 раза в сравнении с расчетами при $K_1=1$, а время ее достижения увеличилось в 1,37 раза. При повышении количества остаточных газов отличия в величине и времени достижения максимальной скорости сгорания становятся еще больше. При $\gamma_{\text{ост}}=0,3$ и $0,5$ максимальная скорость сгорания снижается в 2 и 3,08 раз соответственно, а время увеличивается в 1,58 и 2,1 раза соответственно. Графики изменения коэффициента реакционной активности кислорода и условной продолжительности окисления активных молекул ДМЭ при различных коэффициентах остаточных газов приведены на рис. 13.

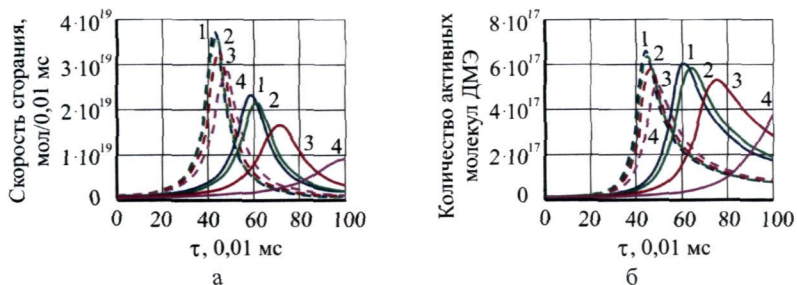


Рис. 12. Изменение скорости сгорания (а) и количества активных молекул ДМЭ (б) в КС постоянного объема: $p=1,5$ МПа, $T=700$ К; –; 1 – $\gamma_{\text{ост}} = 0$; 2 – $\gamma_{\text{ост}} = 0,1$; 3 – $\gamma_{\text{ост}} = 0,3$; 4 – $\gamma_{\text{ост}} = 0,5$; сплошные линии – $K_1=\text{var}$, пунктирные линии – $K_1=1$

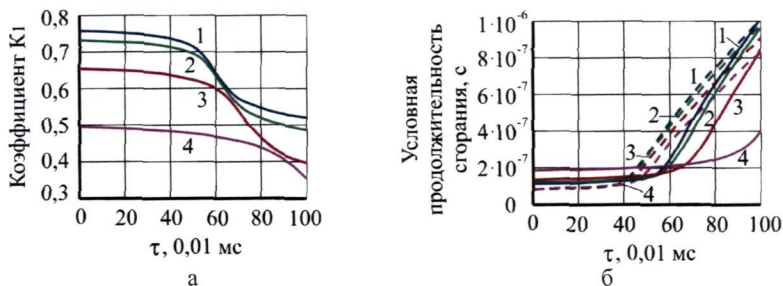


Рис. 13. Изменение коэффициента K_1 (а) и τ_y (б) в КС постоянного объема при сгорании ДМЭ: $p=1,5$ МПа, $T=700$ К; 1 – $\gamma_{\text{ост}} = 0$; 2 – $\gamma_{\text{ост}} = 0,1$; 3 – $\gamma_{\text{ост}} = 0,3$; 4 – $\gamma_{\text{ост}} = 0,5$; сплошные линии – $K_1=\text{var}$, пунктирные линии – $K_1=1$

Без учета влияния инертных компонентов ($K_1=1$) условная продолжительность окисления активных молекул топлива (пунктирные линии) в период задержки воспламенения на 26 % меньше, чем при учете влияния (сплошные линии) (рис. 13,б). Это приводит к повышению частоты образования и окисления активных молекул топлива и увеличению скорости сгорания ДМЭ в начальный период продолжительностью 0,4 мс.

При учете влияния инертных компонентов величина коэффициента K_1 изменяется в широких пределах, например: при максимальном исследованном $\gamma_{\text{ост}}=0,5$ коэффициент реакционной активности кислорода K_1 уменьшается от начального значения 0,496 до менее 0,1, то есть более чем в 5 раз (на рис. 13,а окончание сгорания не показано). Это приводит к быстрому увеличению τ_y и значительному затормаживанию процесса сгорания, несмотря на обогащение смеси.

Таким образом, применение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 позволяет моделировать замедление образования и продолжительности окисления активных молекул топлива при балластировке окислителя азотом, а также в процессе сгорания по мере изменения состава горючей смеси при различных коэффициентах остаточных газов.

В главе 4 приведены расчетно-теоретические и экспериментальные результаты повышения эффективности процесса сгорания топлива при помощи ПФЗ. Моделирование процессов формирования первичного очага горения высокоэнергетическим плазменным факелом и движения образованного им фронта пламени производилось применительно к гомогенной ТВС широкого качественного состава (ДМЭ, метана и пропана). Результаты расчетов подтверждены экспериментальными данными автора по сгоранию дизельного топлива при ПФЗ в условиях камеры постоянного объема и реального двигателя типа В-2 и 2В ООО «ЧТЗ-Уралтрак».

Энергия плазменного факела повышает температуру горючей смеси в первоначальном очаге на ΔT (рис. 14) и обеспечивает увеличение в нем количества активных молекул топлива и ускорение процесса сгорания. Далее эти процессы интенсифицируются и во фронте пламени. Выделение большего количества теплоты при более интенсивном сгорании топлива приводит к увеличению толщины фронта пламени δ (рис. 14 и 15) и скорости его движения по КС. Таким образом, проведенные расчетные исследования показывают, что увеличением удельной объемной энергии плазменного факела можно интенсифицировать процесс сгорания гомогенных воздушных смесей различных углеводородов за счет увеличения температуры во фронте пламени и роста его толщины. Исследованный диапазон составов смесей (α от 0,5 до 5,0) включает практически все эксплуатационные режимы двигателей, работающих на газообразном топливе.

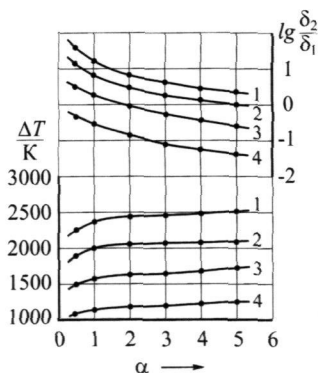


Рис. 14. Влияние коэффициента избытка воздуха гомогенной пропано-воздушной смеси на рост δ и ΔT : 1 – $q_{пл\ ф} = 3,0$ Дж/см³; 2 – $q_{пл\ ф} = 2,5$ Дж/см³; 3 – $q_{пл\ ф} = 2,0$ Дж/см³; 4 – $q_{пл\ ф} = 1,5$ Дж/см³

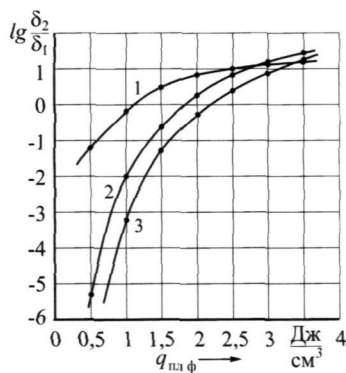


Рис. 15. Влияние удельной объемной энергии плазменного факела на рост δ для гомогенных воздушных смесей при $\alpha = 1$, $T = 293$ К, $p = 0,1$ МПа: 1 – ДМЭ; 2 – пропан; 3 – метан

Экспериментальные исследования закономерностей процессов принудительного воспламенения и сгорания дизельного топлива при моделировании ПФЗ производились в КС постоянного объема, а также на дизелях 1Ч15/16 ($\epsilon_r=8$) и 12ЧН15/18 ($\epsilon_r=14,5$ и $\epsilon_r=12$). Предварительно с помощью хроматографического анализа было установлено, что при электроразряде в

различных углеводородных топливах (октане, дизельном топливе, бензине А-76 и этиловом спирте) в среде аргона происходят не только физические процессы (нагрев, испарение, распыливание и т.д.), но и распад углеводородов на мелкие активные компоненты (в основном водород и метан), способные интенсифицировать процессы воспламенения и сгорания различных смесей в самых неблагоприятных условиях.

Экспериментальная оценка предельных возможностей ПФЗ по инициации процесса сгорания ТВС произведена на примере дизельного топлива, распыленного на пусковых частотах вращения дизеля в КС постоянного объема при давлении 0,64...1,5 МПа и температуре 270...293 К. Исследования процесса смесеобразования в этой камере, имитирующей КС дизелей типа В-2 и 2В, показали, что для сливной топливной аппаратуры при низких частотах вращения коленчатого вала ($n=40...100 \text{ мин}^{-1}$) характерен дробящийся впрыск топлива. Причем дробление происходит не просто на отдельные впрыски (обычно 2...4 в зависимости от величины цикловой подачи и скоростного режима), следующие с некоторым интервалом, а каждый из них состоит из 5...7 микровпрысков (рис. 16). При наложении струек топливо примерно равномерно распределяется в объеме, занимаемом топливным факелом.

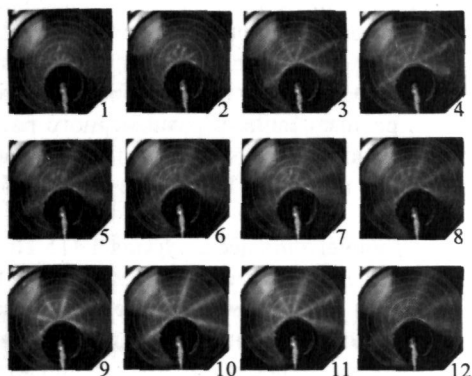


Рис. 16. Развитие топливных факелов в процессе топливоподачи при $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ (через каждый град. п.к.в.)

По осциллограммам давления перед распыливающими отверстиями установлена максимальная скорость ($\sim 35 \text{ м/с}$) и минимальный средний диаметр каплей ($\sim 80 \cdot 10^{-6} \text{ м}$). Предварительные расчеты показали, что в высокоэнергетическом плазменном факеле капли такого размера могут испариться на 50 % за $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, а полностью – за $\sim 8 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Экспериментальные исследования принудительного зажигания распыленного дизельного топлива производились с осциллографированием давления в КС и одновременной скоростной киносъемкой процесса выгорания топлива через специальное окно. Пример полученных результатов обработки осциллограмм в виде давления, температуры, доли выгоревшего топлива x и скорости его выгорания dm_T/dt представлен на рис. 17. Доля выгоревшего топлива достигала $\sim 0,35$, что является значительным достижением при условии низкой температуры смеси ($\sim 293 \text{ К}$) и низкого качества распыливания топлива. Скоростная киносъемка процесса выгорания топлива в камере постоянного объема подтвердила результаты расчетов ха-

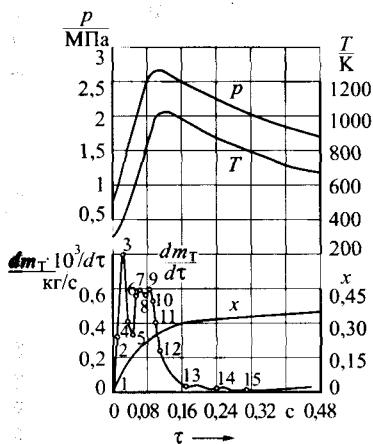


Рис. 17. Изменение параметров процесса сгорания в КС постоянного объема: $\Delta p_{\text{КС}}=0,64$ МПа; $T_{\text{КС}}=293$ К; $n=100$ мин⁻¹; $\alpha=1,07$; числами обозначены номера фото на рис. 18

рактических тепловыделения. На фотографиях, отпечатанных с киноплетки (рис. 18), размеры светящейся горячей смеси согласуются с расчетной скоростью выгорания топлива на рис. 17.

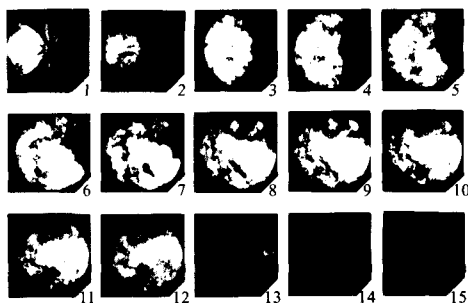


Рис. 18. Процесс выгорания ТВС в КС постоянного объема при ПФЗ: номера фото соответствуют точкам на рис. 17

Проведенные исследования показали, что параметры процесса сгорания пропорционально улучшаются как при увеличении частоты вращения коленчатого вала дизеля, так и давления в КС постоянного объема (рис. 19). Это происходит вследствие более мелкого распыливания и равномерного распределения топлива по КС. Следовательно, при применении гомогенной ТВС интенсификация процесса сгорания с помощью ПФЗ значительно облегчится.

Экспериментальные исследования рабочего процесса дизеля 1415/16 с ПФЗ проводились на пусковых частотах, на которых самовоспламенение в цилиндре достигалось только при помощи факельного подогрева свежего заряда (рис. 7 и 8), а среднее индикаторное давление p_i не превышало 0,38 МПа. Обработка индикаторных диаграмм показала, что увеличение подачи до $0,18 \cdot 10^{-3}$ кг/цикл резко повышает p_{max} и значительно улучшает индикаторные показатели (рис. 20). Дальнейшее увеличение подачи до $0,36 \cdot 10^{-3}$ кг/цикл приводит к незначительному повышению p_{max} и p_i , а также индикаторной мощности и работы цикла (N_i и L_i) (рис. 20). Одновременно ухудшаются экономические показатели: индикаторный КПД η_i и индикаторный удельный расход топлива q_i . Однако при $\alpha < 1$ максимальная скорость тепловыделения не снижалась, а p_i превышало 0,5 МПа.

Аналогичные результаты применения ПФЗ получены в дизеле 12ЧН15/18 ($\epsilon_r=12$) на режимах холодного пуска при температурах до минус 25°C. ПФЗ обеспечивало воспламенение топлива с первого цикла практически в момент электроразряда. Максимальное давление сгорания в первом цикле достигало 3,8 МПа и находилось в ~ 10 град. п.к.в. после ВМТ.

По мере разгона дизеля процесс сгорания перемещался на линию расширения – сказывался недостаток времени на подготовку ТВС. Если сразу после разгона рабочий цикл был далек от совершенства (кривая 1 на рис. 21), то в заключительной стадии прогрева сгорание происходило удовлетворительно в результате улучшения смесеобразования и интенсификации сгорания (кривая 2).

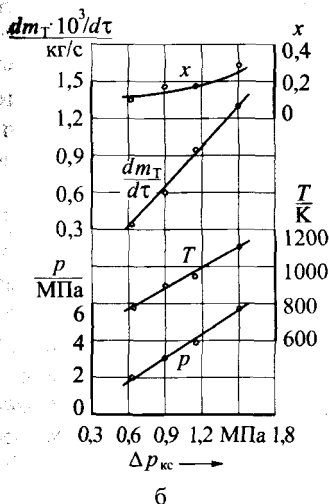
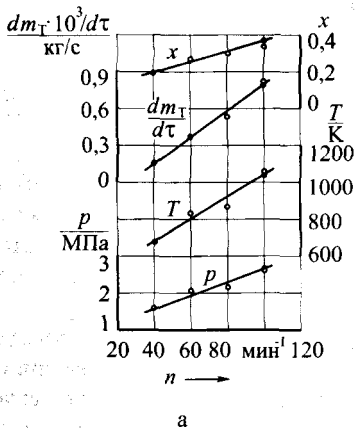


Рис. 19. Зависимость максимальных значений параметров процесса сгорания в КС постоянного объема от n (а) и от $\Delta p_{кc}$ (б): а – $\Delta p_{кc}=0,64$ МПа; $T_n=293$ К; $\alpha=1,07...1,2$; б – $T_n=270...279$ К; $n=70...120$ мин⁻¹

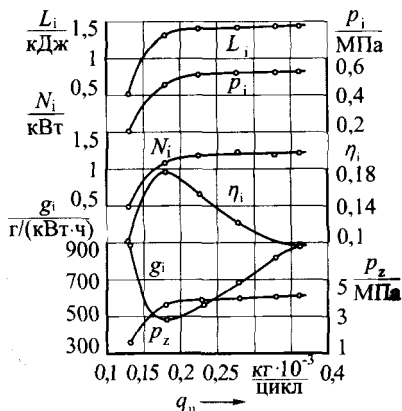


Рис. 20. Влияние цикловой подачи топлива на индикаторные показатели рабочего цикла дизеля 1Ч15/16 с ПФЗ

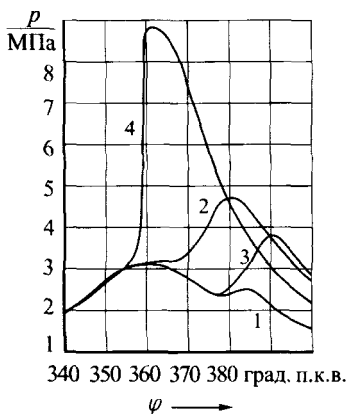


Рис. 21. Индикаторные диаграммы работы дизеля 12ЧН15/18 ($\epsilon_r=14,5$) при $n=700...800$ мин⁻¹: 1 – сразу после разгона с ПФСЗ; 2 – в заключительной стадии прогрева с ПФСЗ; 3 – после выключения ПФЗ; 4 – с воспламенением от сжатия гомогенной ТВС

Для исследования предельных возможностей организации самовоспламенения от сжатия гомогенной ТВС на том же дизеле на режимах пуска и прогрева сняты индикаторные диаграммы при перегреве паров дизельного топлива во впускном коллекторе (кривая 4). Они характеризовались высокими p_{\max} и скоростью нарастания давления за 1...5 град. п.к.в. до ВМТ, несмотря на низкую температуру двигателя и окружающей среды (около минус 15 С), и неуправляемостью момента воспламенения. В отличие от внешнего смесеобразования штатная система топливоподачи дизеля 12ЧН15/18 при этих условиях не способна обеспечить самовоспламенение от сжатия в цилиндре. Качественное сгорание распыленного топлива и надежный запуск дизеля происходили только при температурах выше +12°С. Проведенные дополнительные исследования влияния параметров плазменного факела и ТВС на показатели рабочего цикла дизелей 1415/16 и 12ЧН15/18 доказали возможность повышения эффективности процесса сгорания распыленного дизельного топлива в условиях реального двигателя с воспламенением от сжатия, когда самовоспламенение затруднено или невозможно.

В главе 5 представлены результаты параметрического анализа показателей процесса сгорания и рабочего цикла для варианта двигателя 4ЧН13/15 (производства ООО «ЧТЗ-Уралтрак») с воспламенением от сжатия и ПФЗ гомогенной ТВС. На их основе разработана концепция и научно обоснованы принципы организации эффективного процесса сгорания топлива и методика выбора параметров перспективного двигателя.

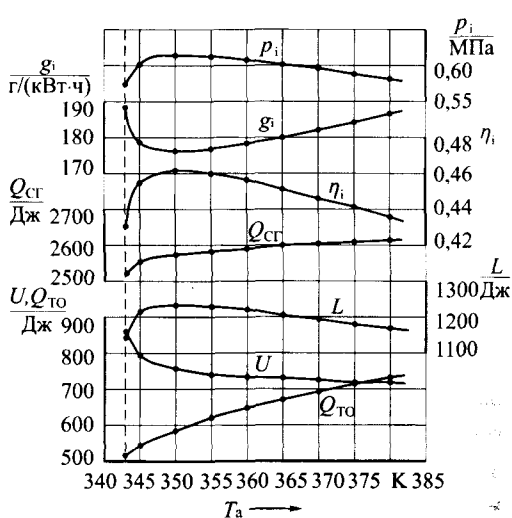


Рис. 22. Влияние температуры в начале сжатия на индикаторные показатели рабочего цикла и составляющие теплового баланса:

--- — граница стабильного воспламенения

Анализ результатов расчетных исследований двигателя без наддува показал, что наибольшее влияние на процесс сгорания оказывает температура в начале сжатия T_a . Наилучшие индикаторные показатели двигателя с воспламенением от сжатия гомогенной смеси, состоящей из 27 % ДМЭ и 73 % ПГ, (при $\epsilon_r=16$, $n=2100$ мин⁻¹ и суммарном коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{см}=2,0$) достигаются при $T_a=350$ К: $\eta_i=0,462$, $p_i=0,615$ МПа и $g_i=176,3$ г/(кВт·ч) (рис. 22). При уменьшении T_a процесс сгорания перемещается на линию расширения, а показатели рабочего цикла резко ухудшаются. При увеличении

T_a сгорание начинается раньше. В результате p_{\max} и T_{\max} растут, а индикаторные показатели постепенно ухудшаются.

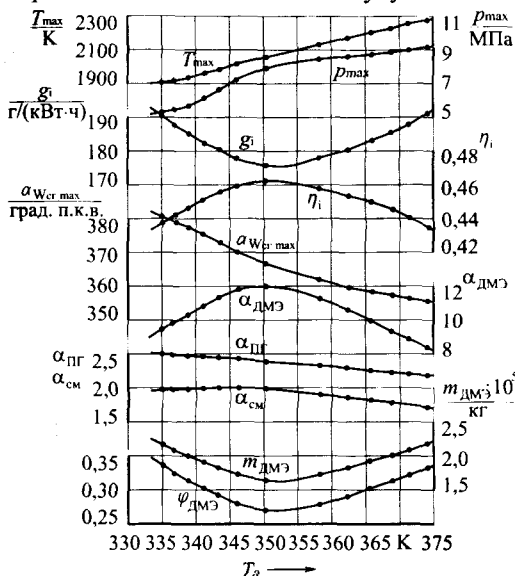


Рис. 23. Зависимость требуемой подачи ДМЭ и показателей рабочего цикла от T_a для обеспечения p_i на уровне 0,615 МПа

p_i на уровне 0,615 МПа при уменьшении T_a на 15,2 К и увеличении на 24 К достаточно увеличить подачу ДМЭ ($m_{\text{ДМЭ}}$) на 33%. При этом η_i снизится всего на 5% (рис. 23).

Таким образом, высокие индикаторные показатели рабочего цикла достигаются выбором температуры в начале сжатия. При случайном отклонении этой температуры от требуемого уровня p_i можно оперативно восстановить изменением цикловой подачи ДМЭ.

Влияние содержания ОГ в рабочем теле на процессы воспламенения и сгорания гомогенной смеси оценивалось через величину коэффициента остаточных газов $\gamma_{\text{ост}}$. Расчетные исследования показали, что при его увеличении от 0 до 0,3 $\alpha_{\text{см}}$ линейно снижается на ~29%. В результате процессы воспламенения и сгорания замедляются, $\alpha_{\text{wcr max}}$ перемещается на линию расширения вплоть до полного прекращения воспламенения. Одновременно основные параметры рабочего цикла ухудшаются. При этом положительным эффектом является снижение максимальной скорости нарастания давления $W_{p \max}$. Отрицательное влияние повышенного содержания ОГ в рабочем теле частично можно снизить увеличением T_a (рис. 24). Например: при увеличении $\gamma_{\text{ост}}$ от 0 до 0,3 ухудшение можно ограничить на уровне 2,9%. Таким образом, применять рециркуляцию ОГ в двигателях с воспламенением от сжатия гомогенной смеси для только улучшения индикаторных показателей не целесообразно.

Величина цикловой подачи ДМЭ в составе смешанного топлива также оказывает влияние на процессы воспламенения и сгорания. Увеличение цикловой подачи при любых условиях интенсифицирует эти процессы. В результате p_{\max} и T_{\max} повышаются. Индикаторные показатели улучшаются, если угол максимальной скорости сгорания $\alpha_{\text{wcr max}}$ приближается к оптимальному значению 6...7 град. п.к.в. после ВМТ (рис. 23). Этот факт позволяет для оперативной компенсации отклонения температуры в начале сжатия применять увеличение цикловой подачи ДМЭ.

Например: для поддержания

Повышенный интерес представляют результаты исследования влияния на процесс сгорания температуры стенок цилиндра T_w . Эта температура наряду с коэффициентом теплоотдачи определяет теплообмен и, соответственно, динамику повышения температуры рабочего тела в цилиндре. Поэтому зависимость индикаторных показателей (η_i , p_i и g_i) двигателя с воспламенением от сжатия однородной смеси от T_w (рис. 25) имеет тот же вид, что и от T_a (рис. 22). Повышенные значения T_w обеспечивают более интенсивное нагревание рабочего тела в процессе воспламенения и меньшие потери теплоты в стенки в процессе сгорания, что способствует увеличению скорости сгорания топлива и повышению максимальных давления и температуры. С одной стороны это оказывает стабилизирующее влияние на процессы воспламенения и сгорания. А с другой – может привести к раннему сгоранию. Поэтому при повышенных значениях T_w следует принимать меньшие T_a . В целом повышение температуры стенок цилиндра в сочетании с пониженными температурами в начале сжатия способствует улучшению индикаторных показателей двигателя с воспламенением от сжатия однородной смеси.

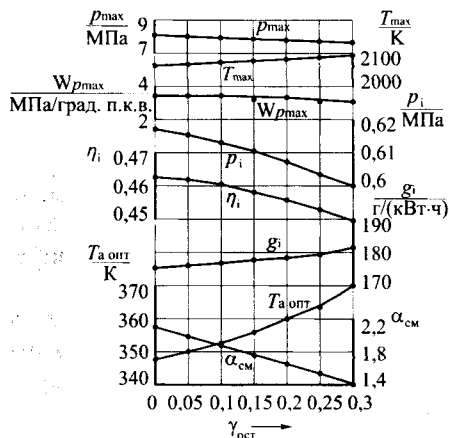


Рис. 24. Влияние $\gamma_{\text{ост}}$ на индикаторные показатели при оптимальной T_a

Практический интерес представляют результаты исследования рабочего цикла варианта перспективного двигателя с наддувом, форсированного до уровня 183,8 кВт (250 л.с.) с сохранением $n=2100 \text{ мин}^{-1}$. При этом особое внимание уделялось влиянию ϵ_r на процессы воспламенения и сгорания. Проведенные исследования показали, что увеличение степени сжатия при любых условиях интенсифицирует эти процессы. В результате p_{max} и T_{max} растут, а индикаторные показатели улучшаются, если угол $\alpha_{\text{сг max}}$ приближается к оптимальному значению 4...6 град. п.к.в. после ВМТ (рис. 26,а), близкому по величине к углу

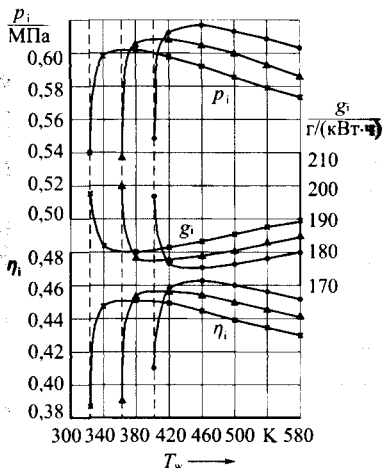


Рис. 25. Влияние T_w на индикаторные показатели: - - - - граница стабильного воспламенения; \circ — $T_a=350 \text{ K}$; Δ — $T_a=360 \text{ K}$; \times — $T_a=370 \text{ K}$

для двигателя без наддува. Здесь следует отметить, что при $T_a=355$ К и $\epsilon_r > 13$ T_{max} превышает 2200 К, что приведет к нежелательному повышению образования оксидов азота. Наибольшее влияние на улучшение индикаторных показателей двигателя (более 9 %) с давлением наддува 0,24 МПа оказывает увеличение ϵ_r (от 12 до 17 единиц) с одновременным снижением T_a (от 361 К до 303 К) для оптимизации момента воспламенения и сгорания (рис. 26,б). При этом $\alpha_{см}$ и p_{max} монотонно растут, а T_{max} монотонно снижается. В результате уже при $\epsilon_r > 14$ она становится меньше 2100 К, при которой выбросы NO_x составят < 125 ppm.

Таким образом, для перспективного двигателя с наддувом, форсированного до уровня 183,8 кВт (250 л.с.) при частоте вращения коленчатого вала $n=2100$ мин⁻¹, целесообразно принимать ϵ_r от 14 до 15 единиц с одновременным снижением T_a до 334 К и 323 К соответственно.

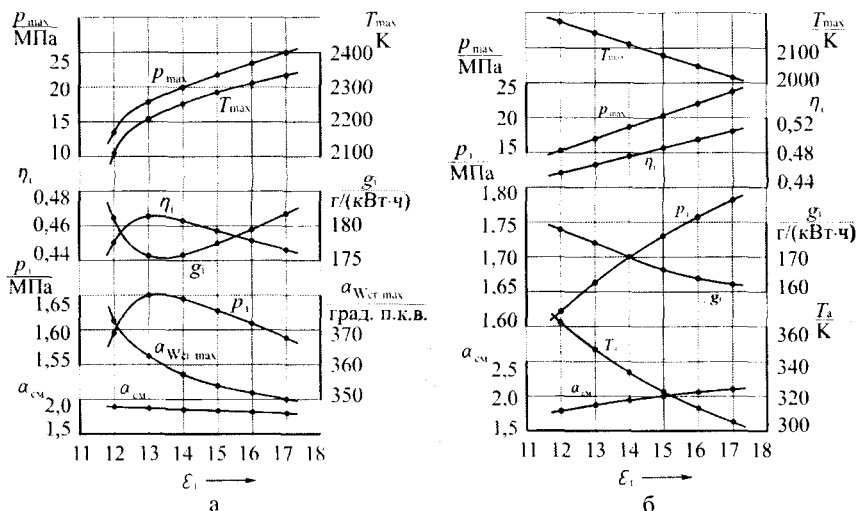


Рис. 26. Зависимость показателей рабочего цикла двигателя с наддувом от ϵ_r при $T_a=355$ К (а) и при оптимальной T_a (б)

Величина угла запаздывания закрытия впускных клапанов $\phi_{кл}$ также оказывает влияние на процессы воспламенения и сгорания. При его увеличении уменьшается массовое наполнение цилиндра свежим зарядом и снижается реальная степень сжатия, что приводит к менее интенсивному росту температуры в процессе сжатия, замедлению процесса воспламенения и перемещению основного тепловыделения позже на линию расширения. В результате индикаторные показатели сначала постепенно улучшаются, достигая максимальных значений (рис. 27,б). Причем, чем выше ϵ_r , тем при больших $\phi_{кл}$ это происходит, а сами индикаторные показатели получаются лучше. Затем индикаторные показатели резко ухудшаются в связи с запаздыванием воспламенения.

Для каждой величины ϵ_r имеется свой $\varphi_{кл}$, при котором достигаются наилучшие индикаторные показатели рабочего цикла. Однако на этих режимах $\alpha_{св}$ получается меньше, а p_{max} и T_{max} наоборот выше, чем на режимах с худшими индикаторными показателями (рис. 27.а). Самые лучшие индикаторные показатели получены при $\epsilon_r = 16$ и $\varphi_{кл} = 70$ град. п.к.в. ($p_i = 1,694$ МПа, $g_i = 170,8$ г/(кВт·ч), $\eta_i = 0,477$). При этом рабочий цикл характеризуется повышенной механической и тепловой напряженностью ($p_{max} = 19,9$ МПа, $T_{max} = 2469$ К). Такая T_{max} однозначно приведет к высокому содержанию NO_x в ОГ, вследствие чего двигатель не будет отвечать экологическим требованиям Евро-4 и Tier-4. К тому же при этих регулировках процесс сгорания может сопровождаться повышенной детонацией. Таким образом, увеличением $\varphi_{кл}$ при повышенной ϵ_r можно улучшить индикаторные показатели рабочего цикла, но это приведет к существенному ухудшению экологических показателей (по содержанию NO_x).

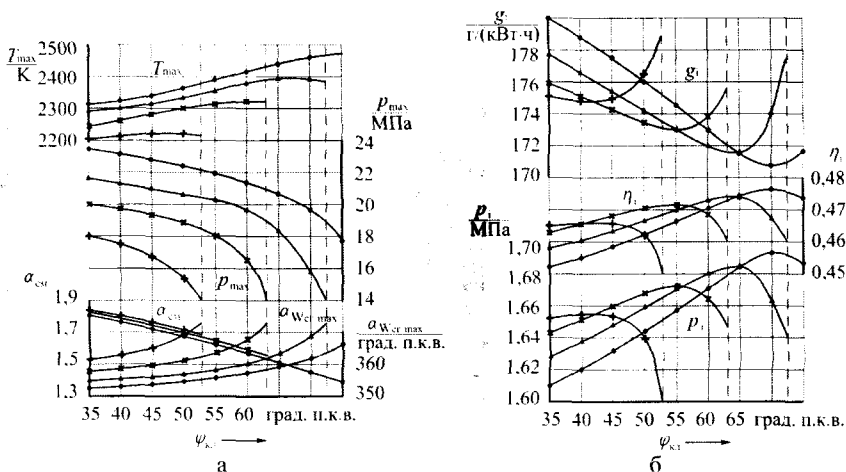


Рис. 27. Влияние $\varphi_{кл}$ на показатели процесса сгорания (а) и индикаторные показатели рабочего цикла (б): --- — граница стабильного воспламенения; $T_a = 355$ К; +— — $\epsilon_r = 13$; -x- — $\epsilon_r = 14$; -Δ- — $\epsilon_r = 15$; -o- — $\epsilon_r = 16$

Для оценки возможности поддержания p_i на заданном уровне с помощью ПФЗ при отклонениях температур T_a и T_w от оптимальных величин выполнены расчеты рабочего цикла двигателя с предельными величинами этих температур на границе стабильного воспламенения и с принудительным воспламенением плазменным факелом (рис. 28). Исследования показали, что применением ПФЗ с соответствующими параметрами разряда можно практически полностью восстановить индикаторные показатели рабочего цикла.

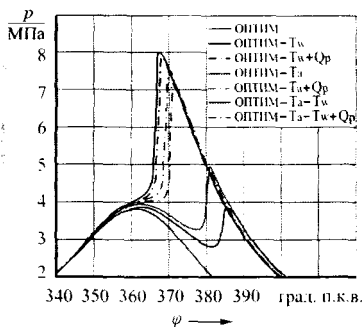


Рис. 28. Изменение давления в цилиндре двигателя при оптимальных $T_a=350$ К и $T_w=450$ К и при пониженных температурах до предельных величин в сравнении с давлениями при ПФЗ

максимальных величин давления p_{max} и температуры T_{max} в цилиндре:

- давление начала сжатия p_a принимать, руководствуясь условиями $\alpha_{сж\ max}=6...7$ град. п.к.в. после ВМТ, $\alpha_{сж}>2,0$, $T_{max}<2050$ К и $p_{max}<19$ МПа;
- среднюю температуру стенок цилиндра принимать не менее 450 К;
- коэффициент $\gamma_{ост}$ принимать минимально возможным;
- массовую долю ДМЭ в смесевом топливе принимать на уровне 0,27;
- угол закрытия впускных клапанов $\phi_{ск}$ принимать таким, чтобы обеспечить выполнение приведенных выше принципов;

– в тех случаях, когда рекомендованное сочетание исходных параметров не обеспечивает надежного воспламенения, следует дополнительно применять ПФЗ, величина энергии и момент электроразряда которого обеспечивают требуемый угол максимальной скорости тепловыделения.

Разработана методика выбора параметров перспективного ПДВС с воспламенением от сжатия и ПФЗ гомогенной ТВС для форсирования до мощности 183,8 кВт, включающая следующие основные действия:

- увеличение цикловой подачи смесового топлива m_t до уровня более $0,15 \cdot 10^{-3}$ кг для повышения среднего индикаторного давления p_i до требуемого уровня 1,62 МПа;
- увеличение давления начала сжатия p_a до уровня более 0,24 МПа для поддержания коэффициента $\alpha_{сж}$ на уровне не менее 2,0;
- снижение (по техническим возможностям) температуры T_a для повышения суммарного коэффициента избытка воздуха;
- снижение геометрической степени сжатия ϵ_t до уровня ~14 единиц для снижения давления p_{max} и температуры T_{max} до приемлемого уровня;
- увеличение или уменьшение угла запаздывания закрытия впускных клапанов в диапазоне 25...75 град. п.к.в. после НМТ для корректировки угла $\alpha_{сж\ max}$ до уровня 5...7 град. п.к.в. после ВМТ.

Выполненные работы позволили сформулировать следующие принципы организации эффективного процесса сгорания топлива для перспективного ПДВС с воспламенением от сжатия и ПФЗ гомогенной ТВС:

– процесс сгорания должен начинаться вблизи ВМТ с постепенным ускорением таким образом, чтобы максимальная скорость нарастания давления наступала на уровне 6...7 град. п.к.в. после ВМТ;

– температуру T_a принимать на 7...12 К выше границы стабильного воспламенения топлива, когда достигаются наилучшие индикаторные показатели при ограниченных значениях

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Основной тенденцией совершенствования топливоподачи, смесеобразования и сгорания в дизелях с целью улучшения их мощностных, экономических и экологических показателей является повышение гомогенизации ТВС. Наибольший эффект достигается применением газовых топлив с образованием бедных горючих смесей. При этом возникают новые неисследованные вопросы организации объемного сгорания смесей широкого качественного состава с воспламенением от сжатия, решение которых составит новое научное направление.

2. Разработанная прикладная тепловая теория на базе комплексной модели объемного горения гомогенной ТВС широкого качественного состава эффективно моделирует скорость сгорания топлива через два основных параметра: количество активных молекул топлива, которые одновременно окисляются по брутто реакции до диоксида углерода и воды, и условной продолжительности их окисления. Для их определения необходимы физические и математические модели процессов объемного горения однородной ТВС в условиях загазованности продуктами сгорания, диссоциации диоксида углерода, изменения состава и массы рабочего тела в цилиндре, формирования и развития первичного очага горения, образованного высокоэнергетическим плазменным факелом.

3. Закономерностями процессов воспламенения и сгорания при самовоспламенении и принудительном ПФЗ гомогенных ТВС в условиях КС поршневого двигателя являются следующие:

- на скорость сгорания топлива имеет повышенное влияние количество инертных компонентов, которые снижают реакционную активность кислорода, так в процессе сгорания ДМЭ при $\alpha=2$ она снижается более чем в 1,5 раза;

- диссоциация диоксида углерода в таких смесях приводит к существенному снижению T_{\max} , например: при $\alpha=1$ она снижается более чем на 102 К при увеличении степени диссоциации на каждые 0,1 единицы. При сгорании бедных смесей ($\alpha>2$ для ДМЭ и дизельного топлива и $\alpha>2,5$ для метана) T_{\max} не превышает 2100 К и ее снижение составляет менее 15 К;

- флегматизирующее влияние метана на ДМЭ при сгорании смесового топлива удобно моделировать увеличением $E_{\text{АН ДМЭ}}$ в расчете 10 кДж/гмоль на 0,1 массовой его доли в составе двухкомпонентного топлива;

- высокоэнергетическим плазменным факелом за счет повышения температуры в ограниченном объеме горючей смеси можно сформировать первоначальный очаг сгорания такого размера, который сможет распространиться на весь объем КС.

4. Особенности рабочего процесса перспективного ПДВС с воспламенением от сжатия и ПФЗ гомогенной ТВС, состоящей из ДМЭ (27 %) и ПГ (73 %), являются следующие:

- наилучшие индикаторные показатели на различных режимах достигаются выбором оптимальных T_a , когда угол максимальной скорости тепловыделения составляет 5...7 град п.к.в. после ВМТ;

– снижение T_a от оптимальной величины всего на 5...7 К приводит к прекращению самовоспламенения, которое можно восстановить увеличением цикловой подачи ДМЭ;

– для компенсации снижения T_a до 15 К потребуется увеличить цикловую подачу ДМЭ на 33 %, что позволит стабилизировать самовоспламенение и снизить ухудшение индикаторных показателей до 5 %;

– увеличение T_w с соответствующим снижением T_a может привести к улучшению индикаторных показателей на ~1,8 % на каждый 100°K в диапазоне от 340°K до 540°K при одновременном снижении T_{max} ;

– увеличение рециркуляции ОГ от 0 до 30 % в этом случае приводит к ухудшению индикаторных показателей на ~2,9 % и нецелесообразно;

– для двигателя с наддувом (0,24 МПа) увеличение ϵ_r от 12 до 17 с соответствующим снижением T_a (от 361 К до 303 К) приводит к улучшению индикаторных показателей на 9 % и более и снижению T_{max} на ~180 К, однако p_{max} при этом возрастает более чем в 1,5 раза (до 24 МПа);

– применение ПФЗ позволяет стабилизировать процесс сгорания и поддерживать заданный уровень нагрузки при отклонениях температур T_a и T_w от оптимальных значений.

5. Обоснованными способами повышения эффективности процесса сгорания в перспективном ПДВС с воспламенением от сжатия и ПФЗ гомогенной ТВС (ДМЭ и ПГ), являются следующие:

– обеспечение максимально высокой температуры огневой поверхности цилиндра как в адиабатном двигателе;

– поддержание температуры свежего заряда на уровне, обеспечивающей оптимальную величину T_a для данного нагрузочного режима;

– увеличение цикловой подачи ДМЭ для оперативной компенсации снижения T_a от оптимальной величины;

– регулирование ϵ_r для ограничения p_{max} ;

– применение более позднего угла закрытия впускных клапанов в сочетании с увеличенной ϵ_r для улучшения индикаторных показателей за счет увеличенной степени расширения;

– применение ПФЗ, обеспечивающего принудительное воспламенение в заданный момент времени.

6. Концепция организации эффективного процесса сгорания топлива с наименьшим образованием оксидов азота для перспективного ПДВС с воспламенением от сжатия гомогенной ТВС состоит в формировании величин температуры, давления и состава смеси в начале сжатия, а также условий сжатия с использованием разработанных моделей и методов расчета, чтобы обеспечить на различных режимах угол $\alpha_{wcr\ max}$ на уровне 5...7 град п.к.в. после ВМТ. При этом T_{max} не должна превышать 2050...2100 К, а p_{max} быть менее 19 МПа. На режимах, когда своевременное сгорание не достигается, следует применять ПФЗ, величина энергии и момент электро-разряда которого обеспечивают требуемый $\alpha_{wcr\ max}$ на уровне 5...7 град п.к.в. после ВМТ.

7. Разработанные стенды (безмоторный с КС постоянного объема для исследований процессов топливоподачи, смесеобразования, ПФЗ и сгорания; одноцилиндрового дизеля 1С15/16 и полноразмерного дизеля 12СН15/18) позволили произвести комплексные исследования, а также экспериментально подтвердить теоретические положения и закономерности влияния на процессы сжатия-расширения, воспламенения, сгорания и рабочего цикла в целом таких параметров, как температуры двигателя и окружающей среды, степени подогрева, загазованности и состава свежего заряда, а также условий сжатия, регулировок серийной топливной аппаратуры и параметров ПФЗ. Тем самым подтверждена эффективность обособленных способов улучшения воспламенения и сгорания на различных режимах работы ПДВС с воспламенением от сжатия гомогенной ТВС.

8. Разработанная прикладная тепловая теория и вскрытые с ее помощью закономерности развития процессов воспламенения и сгорания при воспламенении от сжатия и принудительном ПФЗ гомогенных ТВС, а также определенные расчетом изменения индикаторных показателей рабочего цикла создают теоретическую базу для ОКР по разработке перспективного ПДВС с низкими выбросами оксидов азота, особенностью которого является применение в качестве топлива природного газа как основного носителя энергии.

Основные результаты опубликованы в следующих работах

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Камалтдинов, В.Г.** Моделирование процесса сгорания в двигателях внутреннего сгорания с воспламенением гомогенного заряда от сжатия / В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелинович, А.С. Теребов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2007. – Вып. 10 – № 25(97). – С. 44–47.

2. **Камалтдинов, В.Г.** Уточненная методика расчета параметров рабочего тела на пусковых режимах дизеля / В.Г. Камалтдинов // Двигателестроение. – 2008. – №2 (232). – С. 31–34.

3. **Камалтдинов, В.Г.** Новая модель процесса горения топлива в ДВС / В.Г. Камалтдинов // Двигателестроение. – 2008. – № 3 (233). – С. 17–20.

4. **Камалтдинов, В.Г.** Влияние состава двухкомпонентного топлива на процесс сгорания в двигателе с объемным самовоспламенением от сжатия / В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелинович // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2008. – Вып. 12 – № 23(123). – С. 46–53.

5. **Камалтдинов, В.Г.** Исследование процессов подачи и распыливания топлива в дизеле с неразделенной камерой сгорания на режимах пуска / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2010. – № 3 (80). – С. 81–90.

6. **Камалтдинов, В.Г.** Управление рабочим процессом в НСС1 двигателе / В.Г. Камалтдинов, С.С. Никифоров // Двигателестроение. – 2010. – № 3 (241). – С. 3–9.

7. **Камалтдинов, В.Г.** Холодный пуск двигателя. Результаты исследования процессов подачи и распыливания топлива / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 9. – С. 9–11.

8. **Камалтдинов, В.Г.** Расчетное исследование процесса сгорания и показателей рабочего цикла НССИ двигателя, работающего на смеси природного газа и диметилового эфира / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2010. – № 6 (54). – С. 8–15.

9. **Камалтдинов, В.Г.** Влияние температуры огневой поверхности цилиндра на процесс сгорания и показатели рабочего цикла НССИ двигателя / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Грузовик. – 2010. – № 12. – С. 38–47.

10. **Камалтдинов, В.Г.** Влияние геометрической степени сжатия и угла закрытия впускных клапанов на процесс сгорания и показатели рабочего цикла НССИ двигателя с наддувом / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2011. – № 2 (56). – С. 9–16.

11. **Камалтдинов, В.Г.** Влияние рециркуляции отработавших газов на процесс сгорания и показатели рабочего цикла НССИ двигателя / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, С.С. Никифоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2011. – Вып. 17 – № 11 (228). – С. 50–56.

12. **Камалтдинов, В.Г.** Стенд для исследования рабочего процесса транспортного дизеля на пусковых режимах / В.Г. Камалтдинов, С.С. Никифоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2011. – Вып. 17 – № 11 (228). – С. 77–82.

13. **Камалтдинов, В.Г.** Расчетное исследование влияния рециркуляции отработавших газов на показатели рабочего цикла НССИ двигателя / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, С.А. Хрипунов // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2011. – № 4 (58). – С. 25–32.

14. Марков, В.А. Рециркуляция отработавших газов в двигателях с воспламенением от сжатия / В.А. Марков, В.Г. Камалтдинов, С.А. Хрипунов // Грузовик. – 2011. – № 6. – С. 14–25.

15. **Камалтдинов, В.Г.** Влияние параметров свежего заряда на показатели рабочего цикла НССИ двигателя с наддувом / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Известия ВУЗов. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 6. – С. 31–37.

16. **Камалтдинов, В.Г.** Геометрическая степень сжатия, угол закрытия впускных клапанов и показатели рабочего цикла НССИ / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Автомобильная промышленность. – 2011. – № 9. – С. 10–14.

17. **Камалтдинов, В.Г.** Снижение реакционной активности кислорода инертными компонентами горючей смеси в двигателях с воспламенением от сжатия / В.Г. Камалтдинов // Двигателестроение. – 2011. – № 4 (246). – С. 20–25.

Авторские свидетельства

18. А. с. 1429656 СССР, МКН F 02 В 3/04. Способ работы двигателя внутреннего сгорания / Г.Д. Драгунов, В.Г. Камалтдинов. – № 4015766/25-06; заявл. 29.01.86; (непубл.).

Международные издания

19. **Камалтдинов, В.** Combustion process modeling in HCCI engine / V. Kamaltdinov // SAE 2011-01-1789. 10 pp.

Материалы международных, всероссийских и региональных конференций

20. Драгунов, Г.Д. Теоретическое обоснование необходимости разработки и реализации нового способа подготовки, воспламенения и сгорания топливовоздушной смеси в дизелях / Г.Д. Драгунов, **В.Г. Камалтдинов** // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров: Сборник избранных докладов 49-ой МНТК ААИ России. Книга 2. – Москва: МГТУ «МАМИ», – 2005. – С. 25–29.

21. **Камалтдинов, В.Г.** Расчет рабочего цикла форсированного транспортного дизеля типа 2В на режимах холодного пуска / В.Г. Камалтдинов, Т.С. Камалтдинова, П.Е. Никонов, Е.В. Абелиович // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: Труды МНТК, 26-28 апреля 2006 г., г. Челябинск. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, – 2006. – С.336–340.

22. Абелиович, Е.В. Экспериментальные исследования особенностей топливopодачи и распределения топлива по камере сгорания на режимах пуска дизеля с объемным смесеобразованием / Е.В. Абелиович, **В.Г. Камалтдинов** // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: Труды МНТК, 26-28 апреля 2006 г., г. Челябинск. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, – 2006. – С. 323–328.

23. **Камалтдинов, В.Г.** Перспективы применения рабочего процесса двигателя с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия / В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелиович // Достижения науки – агропромышленному производству: Материалы XLII МНТК. – Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2008. – С.182–186.

24. **Камалтдинов, В.Г.** Анализ способов форсирования дизелей комбинированной подачи топлива / В.Г. Камалтдинов, В.В. Вязовский // Достижения науки – агропромышленному комплексу: Труды МНТК, 31 января- 2 февраля 2008 г., г. Челябинск. – Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2008. – С. 186–193.

25. **Камалтдинов, В.Г.** Применение новой модели процесса горения топлива для моделирования рабочего процесса различных ДВС: Тезисы доклада на ВНТС в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелиович // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение», – 2009. – № 4 (77). – С. 124.

26. Драгунов, Г.Д. Экспериментальное исследование рабочего цикла дизеля типа 1С15/16 с плазменно-факельным зажиганием на пусковых режимах: Тезисы доклада на ВНТС в МГТУ им. Н.Э. Баумана / Г.Д. Драгунов, **В.Г. Камалтдинов** // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2010. – № 3 (80). – С. 123.

27. **Камалтдинов, В.Г.** Экспериментальное исследование рабочего цикла дизеля типа 1С15/16 при моделировании факельного подогрева на

пусковых режимах: Тезисы доклада на ВНТС в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, С.С. Никифоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2010. – № 3 (80). – С. 123.

28. **Камалтдинов, В.Г.** Методика расчета процесса сгорания в двигателях с воспламенением от сжатия при нестационарном тепло- и массообмене / В.Г. Камалтдинов, Г.Д. Драгунов, В.А. Марков // Сб. науч. тр. международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – С. 226–230.

29. Марков, В.А. Управление рециркуляцией ОГ в транспортных дизелях: Тезисы доклада на ВНТС в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.А. Марков, Е.А. Сиротин, С.А. Хрипунов, В.И. Шатров, **В.Г. Камалтдинов** // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 4 (85). – С. 120.

30. **Камалтдинов, В.Г.** Влияние температуры и состава свежего заряда на момент самовоспламенения, процесс сгорания и показатели рабочего цикла HCCI двигателя: Тезисы доклада на ВНТС в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, С.С. Никифоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 4 (85). – С. 121.

31. **Камалтдинов, В.Г.** Модель горения топлива и движения фронта пламени под действием энергонасыщенного плазменного факела: Тезисы доклада на ВНТС в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, Г.Д. Драгунов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 4 (85). – С. 121–122.

32. **Kamaltdinov, V.** Combustion process modeling in HCCI engine. JSAE 201119118. 10 pp.

Зарегистрированные программы и отчеты о НИР

33. Свидетельство ОФАП № 11606. Программа расчета рабочего цикла двигателя с воспламенением гомогенного заряда от сжатия HCCI combustion v.1.0 / **Камалтдинов В.Г.**, Абелювич Е.В.; выдано 30.10.2008 г.

34. Инв. № 50200901166 ВНИИЦ. Программа расчета процесса сгорания в камере постоянного объема «Сгорание при $V=\text{const}$ » / **Камалтдинов В.Г.**, Абелювич Е.В., Никифоров С.С.; зарегистрирована 02.12.2009 г.

35. Инв. № 02201050682 ВНИИЦ. Обоснование методов разработки малотоксичного рабочего цикла и повышения ресурса основных трибосопряжений: отчет о НИР / Ю.В. Рождественский, Е.А. Лазарев, **В.Г. Камалтдинов** и др.; зарегистрирован 13.01.2010 г. – 218 с.

36. Инв. № 02201000220 ВНИИЦ. Исследование нестационарного горения гомогенных смесей под действием низкотемпературной плазмы: отчет о НИР / **В.Г. Камалтдинов**, С.С. Никифоров, Е.В. Абелювич; зарегистрирован 20.01.2010 г. – 115 с.

37. Свидетельство ФГУ ФИПС № 2010617228. Программа расчета рабочего цикла двигателя с воспламенением от сжатия «Рабочий цикл» / **Камалтдинов В.Г.**; выдано 29.10.2010 г.

Региональные издания

38. Фарафонов, М.Ф. Расчет процесса сжатия дизеля с учетом теплообмена коэффициентом адиабатности / М.Ф. Фарафонов, **В.Г. Камалтдинов** // Автомобили, тракторы и двигатели: Сб. науч. тр./ Челябин. политех. ин-т. – Челябинск: ЧПИ. – 1976. – С. 45–47.

39. Драгунов, Г.Д. Параметры цикла дизеля на пусковых режимах / Г.Д. Драгунов, **В.Г. Камалтдинов**, В.Ю. Абелинович // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Сб. науч. тр./ Челябин. политех. ин-т. – Челябинск: ЧПИ. – 1983. – С. 22–26.

40. **Камалтдинов, В.Г.** Критерий воспламенения топливно-воздушной смеси на режимах пуска дизеля / В.Г. Камалтдинов // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Сб. науч. тр./ Челябин. политех. ин-т. – Челябинск: ЧПИ. – 1984. – С. 42–45.

41. **Камалтдинов, В.Г.** Уточненная методика определения параметров рабочего тела при сжатии-расширении на пусковых режимах / В.Г. Камалтдинов // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Сб. науч. тр./ Челябин. политех. ин-т. – Челябинск: ЧПИ. – 1985. – С. 87–91.

42. **Камалтдинов, В.Г.** Самовоспламенение топлива в дизеле на пусковых режимах / В.Г. Камалтдинов, А.М. Шитиков // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Сб. науч. тр./ Челябин. политех. ин-т. – Челябинск: ЧПИ. – 1986. – С. 63–67.

43. Драгунов, Г.Д. Возможности принудительного воспламенения топливовоздушной смеси в холодной бомбе / Г.Д. Драгунов, **В.Г. Камалтдинов**, А.М. Шитиков // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Сб. науч. тр. / Челябин. политех. ин-т. – Челябинск: ЧПИ. – 1987. – С. 24–28.

44. **Камалтдинов, В.Г.** Организация рабочего процесса в период прогрева дизеля при пуске / В.Г. Камалтдинов, А.М. Шитиков, И.С. Липатников // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Сб. науч. тр./ Челябин. политех. ин-т. – Челябинск: ЧПИ. – 1988. – С. 38–40.

45. **Камалтдинов, В.Г.** Возможности сокращения периода задержки воспламенения при пуске / В.Г. Камалтдинов, И.С. Липатников, А.М. Шитиков // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Сб. науч. тр./ Челябин. политех. ин-т. – Челябинск: ЧПИ. – 1989. – С. 42–45.

46. **Камалтдинов, В.Г.** Схема рабочего процесса при холодном пуске дизеля / В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелинович // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: Научный вестник ЧВВАКИУ, г. Челябинск. – 2004. – Вып. 17. – С. 33–36.

47. Драгунов, Г.Д. Анализ продуктов крекинга углеводородного топлива электроразрядом в условиях дизеля / Г.Д. Драгунов, **В.Г. Камалтдинов**, Е.В. Абелинович // Конструирование и эксплуатация наземных транспортных машин: Сборник трудов. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2006. – С. 34–40.