

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.А. Марков

vladimir.markov58@yandex.ru

В.И. Шатров

markov58@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

На основе анализа материалов Всероссийской научно-технической конференции имени профессора В.И. Крутова, состоявшейся 31 января 2018 г., обоснована актуальность исследований, направленных на дальнейшее совершенствование систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. Основным объектом исследования являлись системы управления и регулирования поршневых двигателей внутреннего сгорания. Показаны возможности таких систем при совершенствовании показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов двигателей. Рассмотрены резервы улучшения мощностных и динамических показателей двигателей с использованием систем управления и регулирования. Проведена оценка современного уровня развития систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок, а также сделаны выводы о перспективах их дальнейшего совершенствования. Рассмотрены основные направления исследований в области топливоподающей аппаратуры дизелей, рабочего процесса двигателей, их адаптации к работе на альтернативных топливах, включая различные биотоплива

Ключевые слова

Теплоэнергетические установки, двигатели внутреннего сгорания, дизельные двигатели, системы автоматического управления, системы автоматического регулирования

Поступила 23.03.2018

© Автор(ы), 2019

Удовлетворение все более жестких требований к показателям теплоэнергетических установок невозможно без дальнейшего совершенствования их систем автоматического управления и регулирования (САУ и САУ). Следует отметить, что в настоящее время 80 % всей энергии, вырабатываемой в мире, приходится на тепловые двигатели [1]. Другие типы энергетических

установок — атомные, гидравлические, ветряные, солнечные, геотермальные и другие вырабатывают остальные 20 % производимой энергии. При этом 70...80 % энергии, создаваемой тепловыми двигателями, производится поршневыми и комбинированными двигателями внутреннего сгорания (ДВС и КДВС). Остальная часть энергии вырабатывается паровыми и газовыми турбинами, паровыми машинами. В связи с этим на конференции в основном были представлены доклады, посвященные ДВС.

Системы автоматического управления и регулирования ДВС и КДВС обеспечивают согласование характеристик разнородных элементов этих двигателей — поршневой части двигателя, системы газотурбинного наддува, систем топливоподачи, газораспределения, охлаждения, рециркуляции и др. [2, 3]. Поэтому наряду с САР и САУ предметом исследований являлись и указанные системы ДВС и КДВС. Ряд докладов был посвящен таким важнейшим проблемам двигателестроения, как улучшение качества рабочего процесса двигателей, обеспечивающего улучшенные показатели их топливной экономичности, снижение вредных выбросов с отработавшими газами (ОГ) теплоэнергетических установок, их адаптация к работе на альтернативных топливах, включая биотоплива [4, 5]. Представленные доклады отражают современное состояние и перспективы развития САР и САУ теплоэнергетических установок различного назначения.

Во вступительном слове председательствующий — доктор технических наук, профессор А.Г. Кузнецов отметил, что конференция проходит в год 150-летнего юбилея факультета «Энергетическое машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Регулярное проведение конференций свидетельствует о том, что проблемы создания систем управления теплоэнергетическими установками остаются актуальными и в настоящее время. Наряду с вопросами создания и совершенствования систем управления тематика докладов, представленных на конференции, отражает широкий круг задач разработки современных тепловых двигателей.

В докладе А.Г. Кузнецова, С.В. Харитонова, Лю Ин (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва) «Расчетное исследование метода отключения цилиндров дизеля» приведены результаты расчетного исследования параметров рабочего процесса четырехцилиндрового автомобильного дизеля при отключении двух цилиндров на режимах низких частот вращения и малых нагрузок. Расчеты проводились для различных вариантов функционирования системы газораспределения: штатной работы клапанов и при закрытых впускных и выпускных клапанах, отключаемых цилиндров. Показано, что отключение цилиндров влияет на такие показатели рабочего процесса, как мощность трения и насосные потери, тепловое состояние цилиндров.

Эффективность метода отключения цилиндров зависит от типа двигателя, используемой топливной аппаратуры, наличия турбонаддува.

А.Г. Кузнецов, С.В. Харитонов, Цзоу Кай (МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили доклад «Проблемы управления энергетической установкой с двигателем Стирлинга». В докладе рассмотрены вопросы разработки системы управления двигателем Стирлинга, работающим от солнечной энергии. Двигатель приводит в действие электрический генератор, подключенный к общей сети. Особенностью таких энергетических установок является зависимость мощности и частоты вращения вала двигателя от интенсивности солнечного излучения. Показано, что для согласования работы двигателя с общей электрической сетью целесообразно использовать асинхронный генератор двойного питания с фазным ротором. Для рассматриваемой энергетической установки предлагается использовать комплексную систему управления с регулирующими воздействиями на двигатель Стирлинга и генератор. Представлена функциональная схема и поставлены задачи разработки предложенной системы управления.

П.В. Волощенко, Ю.Е. Хрящёв (ОАО «ЯЗДА», ЯГТУ, г. Ярославль) выступили с докладом «Предложения по оптимизации конструкции электроуправляемой форсунки». В целях сравнения показателей впрыскивания и распыливания топлива проведен анализ тенденций развития конструкций электрогидравлических форсунок для аккумуляторных топливоподающих систем дизелей. Отмечена необходимость повышения вплоть до 300 МПа давления впрыскивания и обеспечения многофазного процесса впрыскивания, обусловленная жесткими требованиями к процессам впрыскивания и распыливания топлива в современных дизелях. Приведены результаты испытаний нескольких вариантов таких форсунок, а также предложения по оптимизации существующих конструкций электроуправляемых дизельных форсунок отечественного производства.

В докладе П.В. Волощенко, Л.Л. Иванова, Ю.Е. Хрящёва (ОАО «ЯЗДА», ЯГТУ) «Клапанная форсунка ударного типа» рассмотрена конструкция форсунки, разработанная в соответствии с патентом РФ № 2540347 «Электроуправляемая форсунка для впрыскивания топлива в двигатель внутреннего сгорания». Для этой форсунки проведены расчеты тягового усилия электромагнита и скоростей движения ударника и клапана. Приведены результаты испытаний электромагнита плунжерного типа, установленного в опытный образец форсунки.

Доклад Ю.Е. Хрящёва, Л.Л. Иванова, А.П. Перепелина, О.Н. Соколова (ЯГТУ) «Исследование процесса распыливания топлива клапанными форсунками» посвящен поиску эффективных методов и средств улучшения

мелкодисперсности распыливания топлива в камерах сгорания дизелей. Показано, что определяющее влияние на процессы прогрева, испарения и сгорания топлива оказывает фактор суммарной поверхности капель распыленного топлива. Применение форсунок с клапанными распылителями способствует эффективному улучшению качества распыливания топлива за счет возможности уменьшения распыливающего сечения.

В докладе Л.Н. Голубкова, А.Ю. Дунина, П.В. Душкина, И.А. Зайкова и В.Н. Митяновой (МАДИ, Москва) «Исследование методов управления передним фронтом характеристики впрыскивания для аккумуляторных топливных систем» представлены результаты расчетного исследования рабочего процесса разработанной электрогидравлической форсунки (ЭГФ). В отличие от существующих конструкций рассматриваемая ЭГФ дополнительно снабжена двумя промежуточными упорами с дополнительными пружинами, один из которых установлен в управляющей камере, а второй — в полости управляющего клапана, с возможностью обеспечения ограничения перемещения управляющего клапана и иглы распылителя на первом этапе впрыскивания. Это обеспечивает формирование ступенчатой характеристики впрыскивания на первом этапе перемещения иглы распылителя. Расчетные исследования и эксперимент подтвердили возможность формирования переднего фронта характеристики впрыскивания путем воздействия на управляющие импульсы тока, подаваемые на электромагнитный клапан ЭГФ без введения дополнительных упоров и пружин. Результаты экспериментального исследования стабильности формирования ступенчатого переднего фронта характеристики впрыскивания ЭГФ с управляющим клапаном, конструкция которого включает в себя направляющий поршень, показали существенную нестабильность цикловой подачи (до 23 %). Расчетное исследование показало, что трение иглы ЭГФ заметно влияет на формирование переднего фронта ступенчатой характеристики впрыскивания.

В докладе Ю.Е. Драгана (ВлГУ, г. Владимир) «Результаты уточнения методики обработки осциллограмм подъема и посадки иглы распылителя электрогидравлической форсунки» представлены результаты работ по созданию отечественной аккумуляторной топливной системы типа *Common Rail*. Была разработана конструкция ЭГФ с емкостными датчиками перемещения якоря электромагнитного клапана и иглы распылителя. На основе анализа осциллограмм перемещения иглы распылителя показана роль деформации деталей ЭГФ на гидродинамические процессы. Определены точки начала разгрузки сжатых деталей и окончания деформации сжатия деталей при закрытой игле. Эффективность разрабо-

танного метода показана на примере обработки осциллограмм, полученных при давлении топлива в аккумуляторе, равном 70 МПа. Расходы топлива при подъеме, посадке иглы распылителя и при положении ее на упоре определялись по экспериментальным зависимостям эффективных проходных сечений распылителя от подъема иглы. Полученные расчетные суммарные расходы топлива через распылитель отличались от экспериментальных данных на 3,6...11,0 % при среднем значении 5,9 %.

В докладе Н.Н. Патрахальцева, Р.О. Камышникова (РУДН, Москва) «Использование универсальных характеристик дизеля для прогнозирования его эксплуатационных эколого-экономических характеристик при регулировании двигателя отключением цилиндров» отмечено, что универсальные характеристики ДВС представляют собой совокупность характеристик с постоянными значениями удельного расхода топлива, концентраций в ОГ токсичных компонентов, выбросов сажи и т. д. Эти характеристики обычно строят в координатах «частота вращения вала двигателя–нагрузка на двигатель». В условиях эксплуатации современные автомобильные двигатели работают с очень низкими коэффициентами загрузки, что приводит к снижению их эксплуатационных эколого-экономических показателей. Одним из методов улучшения этих показателей является метод регулирования двигателя отключением части цилиндров. Такое регулирование приводит к повышению нагрузки оставшихся в работе (активных) цилиндров и, как следствие, — к улучшению экологических и экономических показателей. В докладе расчетным путем с использованием универсальных характеристик автомобильных дизелей показаны возможности снижения удельных расходов топлива и выбросов токсичных компонентов ОГ при отключении части цилиндров двигателя по сравнению с полноразмерным двигателем.

Н.Н. Патрахальцев, Л.А. Ластра Эспироза, О.В. Камышников, Хосе Гальдос Гомез (РУДН, Национальный инженерный университет Перу, г. Лима, Национальный университет Сан Августина, г. Аррекипа, Перу) представили доклад «Анализ работы газодизеля с внутренним смесеобразованием в условиях высокогорья». Отмечено, что исследования проведены в Перу в рамках научно-технического сотрудничества между университетами России и Перу. Условия высокогорья реализованы при испытаниях дизеля в городе Аррекипа (Перу), находящемся на высоте 2500 м над уровнем моря. Параметры работы в нормальных условиях получены при испытаниях того же дизеля в городе Лима (на уровне моря). Газодизель с внутренним смесеобразованием создан путем оснащения штатной топливной аппаратуры (ТА) дизеля клапаном регулирования начального давления. С помощью

этого клапана в цилиндры дизеля подавался сжиженный углеводородный газ — пропан-бутановая смесь. Благодаря этому в линии высокого давления ТА (перед форсунками) образуется смесевое топливо, впрыскиваемое в цилиндры дизеля штатной форсункой. При этом реализуется газодизельный цикл с внутренним смесеобразованием и самовоспламенением рабочей смеси от дизельного топлива, присутствующего в смесевом топливе. Благодаря такой организации рабочего процесса достигнута частичная компенсация «высокогорной» потери мощности и экономичности. Кроме того, при такой организации рабочего процесса была снижена примерно на 40 % дымность ОГ.

В докладе Ф.Б. Барченко, Ш.Р. Лотфуллина (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РУДН) «Повышение эколого-экономических показателей газового монотопливного двигателя изменением его активного рабочего объема» показано, что в условиях эксплуатации автобусного газового двигателя его средняя загрузка примерно равна 20 %, причем время его работы на холостом ходу составляет ~ 30 % всего времени работы. На этих режимах увеличиваются удельный расход топлива и выбросы токсичных компонентов ОГ. Повысить нагрузку цилиндров двигателя и тем самым улучшить его эколого-экономические показатели можно отключением части цилиндров на режимах малых нагрузок. В качестве конструктивного показателя двигателя широко используется показатель «рабочий объем двигателя». В проведенных исследованиях использован новый показатель: «активный рабочий объем двигателя», т. е. сумма рабочих объемов неотключенных цилиндров. Он является регулировочным показателем, изменяемым во время работы двигателя на режимах пониженных нагрузок. В работе показаны возможности расчетного определения эксплуатационных показателей с использованием экспериментально полученных универсальных (многопараметрических) характеристик двигателя.

Э.А. Савастенко, А.А. Савастенко (РУДН) представили доклад «Повышение топливной экономичности и снижение токсичности ОГ бензинового двигателя методом отключения цилиндров» (РУДН). Отмечено, что на режимах с малыми нагрузками эксплуатационные показатели двигателя с искровым зажиганием заметно ухудшаются. Для улучшения показателей предложено реализовать регулирование двигателя изменением его рабочего объема путем отключения цилиндров на указанных режимах. Предложена расчетно-экспериментальная методика оценки показателей экономичности и экологичности двигателей с искровым зажиганием при работе на малых нагрузках и отключении ряда цилиндров. Исследованы различные алгоритмы последовательности и числа отключаемых

цилиндров двигателя *Audi V6*, имеющего шесть цилиндров, при скоростях движения автомобиля на четвертой передаче. Наиболее эффективным признан следующий алгоритм работы: до частоты вращения 3600 мин^{-1} целесообразна работа двигателя на двух активных цилиндрах, до частоты 4900 мин^{-1} — на трех цилиндрах и до частоты 5800 мин^{-1} — на четырех цилиндрах. При большей частоте вращения рекомендуется работа на всех шести цилиндрах. Показано, что реализация алгоритма регулирования 2-3-4-6 позволяет снизить расход топлива примерно на 11,8 % и удельные выбросы оксидов азота на 6,3 % по сравнению с работой на всех шести активных цилиндрах.

А.Н. Нетрусов, В.М. Фомин (Московский политехнический университет) представили доклад «Анализ характеристик ротора турбокомпрессора с рабочими колесами из композиционных материалов». Отмечено, что использование систем газотурбинного наддува в современных автомобильных ДВС стало практически повсеместным. Одной из проблем, возникающих при газотурбинном наддуве этих двигателей, является пониженная эксплуатационная надежность подшипникового узла турбокомпрессора (ТКР). Эта проблема может быть решена путем уменьшения массы деталей ротора ТКР и снижения его момента инерции за счет выбора материалов с уменьшенной плотностью. Объектом исследования являлся ротор ТКР с рабочими колесами, выполненными из традиционных и композиционных материалов. Исследование проводилось с использованием метода математического моделирования в программном комплексе (ПК) *Femap with NX Nastran*. Предварительный анализ показал, что для изготовления турбинного колеса наиболее приемлем композит с углеродным волокном в карбидокремниевой матрице (C/SiC), который может успешно конкурировать с жаропрочными никелевыми сплавами. Для повышения прочности и эксплуатационной надежности компрессорного колеса ТКР предусматривалось внешний слой базового материала (матрицы) армировать непрерывными углеродными волокнами. Армирующий слой состоял из семи монослоев, каждый из которых имеет толщину 0,1 мм. Установлено, что при изготовлении колеса компрессора из угленаполненного полиамидоимида масса ротора ТКР снижается на 10 %, момент инерции — на 17 % по сравнению с никелевым сплавом. Применение полиамидоимида с армирующим слоем с непрерывными волокнами на внешней поверхности диска позволило снизить массу и момент инерции ротора на 13 и 22 % соответственно.

В докладе Ю.А. Антипова, И.К. Шаталова, И.И. Шаталовой, Н.У. Матякубовой (РУДН) «Парогазовая установка на базе газопоршневого тепло-

вого двигателя» рассмотрена возможность использования мощных поршневых газовых двигателей (ГД) без наддува для выработки электрической энергии в местах, удаленных от линий электропередач. В этом случае теплота ОГ таких двигателей либо совсем не используется, либо используется для нагрева воды. Такие ГД имеют эффективный КПД, равный 35...38 %, и достаточный срок службы до капитального ремонта. Приведены результаты оценки эффективности использования схемы энергетической установки, предназначенной только для выработки электрической энергии и включающей в себя несколько ГД и паровую турбину. Отработавшие газы от ГД поступают в общий котел-утилизатор, откуда полученный пар идет в паровую турбину, где вырабатывается дополнительная электроэнергия. За исходные были приняты следующие данные: шесть ГД общей мощностью 4000 кВт с КПД, равным 35 %; топливо с низшей теплотой сгорания, равной 45 МДж/кг; температуры ОГ и уходящих газов составляют 700 и 100 °С; паровая турбина с давлением пара на входе и выходе из турбины 5 МПа и 5 кПа; температура пара на входе в паровую турбину 540 °С; давление в конденсаторе 5 кПа; внутренний и механический КПД турбины 80 и 98 %. Расчеты показали, что утилизация теплоты ОГ ГД в целях выработки пара для паровой турбины повышает на 24...26 % электрическую мощность установки при тех же затратах топлива.

В.И. Ерохов (Московский политехнический университет) представил доклад «Экологические параметры газобаллонного автомобиля, работающего на сжиженном природном газе». Отмечено, что эффективным энергоносителем для транспорта является сжиженный природный газ (СПГ). Уже разработаны транспортные средства, работающие на этом энергоносителе. В частности, на СПГ переведены двигатели КамАЗ 820.60-260 (8 VЧН 12/13), работающие с принудительным воспламенением рабочей смеси от свечи зажигания. При сравнительной оценке экологических параметров газобаллонного автомобиля с указанным двигателем определены выбросы вредных веществ при различной организации рабочего процесса. В качестве базового выбран 13-режимный испытательный цикл (Правило R 49 ECE). Полученные значения выбросов вредных веществ сравнивались с предельными выбросами, установленными нормами EURO-5. Рассмотрены ГД с принудительным воспламенением рабочей смеси, газовый дизель с воспламенением СПГ от запальной дозы дизельного топлива и обычный дизель с рециркуляцией ОГ и их нейтрализацией. Выбросы оксидов азота трех типов двигателей составили соответственно 1,8; 0,25 и 1,9 г/(кВт·ч) при предельном выбросе этого наиболее значимого газообразного токсичного компонента ОГ,

регламентируемого нормами EURO-5, равном $2 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Эмиссия твердых частиц, основным компонентом которых является сажа, оказалась равной 0; 0,35 и 0,018 $\text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ при ее предельно допустимом значении 0,5 $\text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Выбросы монооксида углерода были равны 0,7; 2,5 и 0,56 $\text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ при их предельно допустимом значении 4 $\text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Эмиссия легких несгоревших углеводородов составила 0,34; 0,12 и 0,02 $\text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ при ее предельно допустимом значении 0,55 $\text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Таким образом, все три типа организации рабочего процесса позволяют обеспечить требования норм EURO-5 по выбросам вредных веществ с ОГ транспортного средства.

В докладе В.В. Фурмана, С.В. Плахова, В.А. Маркова, Л.Л. Мягкова, А.Ю. Арпишкина («ППП Дизельавтоматика», г. Саратов, МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Совершенствование системы электронного управления топливоподачей газодизельного двигателя» показаны преимущества использования газообразных топлив и рассмотрены особенности работы дизелей, адаптированных к работе на природном газе. Представлена разработанная в «ППП Дизельавтоматика» система электронного управления топливоподачей системы типа ЭСУВТ.01 для дизельных и газодизельных вариантов тепловозного дизеля Д50 (6 ЧН 31,8/33) производства ОАО «Пензадизельмаш». Она включает в себя комплект электроуправляемых насосов 4ЭТН.03 с электрогидравлическими клапанами, управляемыми от электронного блока. Клапаны установлены в линии высокого давления топливных насосов и обеспечивают управление фазами топливоподачи. Отмечены сложные условия работы такого электронно-управляемого клапана, характеризующиеся высокой цикличностью его перемещений и большими контактными напряжениями на кромке клапана, а также усталостными напряжениями в винте его крепления. В ряде случаев это может приводить к отрыву головки винта клапана. Проведено моделирование работы этого клапана в 3D постановке и расчетным путем выявлены причины разрушения винта крепления якоря электронно управляемого клапана топливного насоса высокого давления.

В.А. Марков, Ф.Б. Барченко, А.Ю. Епишин, Е.Ф. Поздняков, С.В. Плахов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЗАО «Форант-Сервис», г. Ногинск, «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) представили доклад «Исследование системы автоматического регулирования дизель-генераторной установки тепловоза». Приведена математическая модель САР тепловозного дизеля с регуляторами различных типов. Рассмотрены традиционные пропорциональный регулятор (П-регулятор) и регулятор, формирующий пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) алгоритм. Проведены расчеты переходных процессов дизеля с этими регуляторами. Для уменьшения колеба-

тельности в переходном процессе предложено использовать П-регулятор с последовательно включенными корректирующими звеньями — форсирующим и интегродифференцирующим. Показана возможность улучшения динамических свойств САР частоты вращения тепловозного дизеля при ее оснащении регулятором с корректирующими звеньями.

В докладе В.Г. Камалтдинова, И.О. Лысова, А.Е. Попова, Е.Б. Рыжука (ЮУрГУ, г. Челябинск) «Установка для исследования процесса сгорания газомоторного топлива» приведены описание и характеристики уникального безмоторного стенда с камерой постоянного объема. Особенностью стенда является его оснащение системами дозирования и подачи СПГ и сжатого воздуха с регистрацией давления в камере. Стенд оборудован системой зажигания с регулируемой энергией разряда, системой высокоскоростной видеосъемки с цветной видеокамерой *Photron FASTCAM SA-X2*, а также системой компьютерного программного управления процессами зажигания и видеосъемки. Камера постоянного объема с внутренним диаметром 82 мм и объемом 0,24 л имеет фронтальное окно из кварцевого стекла КУ-2 для видеорегистрации процессов искрообразования, формирования первичного очага и развития фронта пламени. Рабочее давление в камере составляет до 50 бар, максимальное — до 100 бар. При исследовании процессов искрообразования и формирования первичного очага видеосъемка проводится со скоростью от 10 000 до 40 000 кадров в секунду. При исследовании процессов развития фронта голубого пламени и сгорания в виде желтого и белого пламени применялась пониженная до 1000...10 000 кадров в секунду скорость видеосъемки. Система зажигания позволяет увеличивать энергию разряда в 2 и 4 раза от исходной энергии, равной 50...75 мДж. Для обеспечения в камере горючей смеси нужного состава разработана специальная методика регулировки состава метановоздушной смеси в диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха α от 0,96 до 2. По результатам экспериментов построены графики перемещения фронта голубого пламени в процессе сгорания метановоздушной смеси при α от 0,96 до 1,2, различных энергиях разряда и различных свечах зажигания.

В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, И.О. Лысов, А.Е. Смолий (ЮУрГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили доклад «Исследование влияния профиля открытой камеры сгорания на формирование топливных струй в камере постоянного объема». Показаны результаты моделирования развития топливной струи на уникальной научной установке «Впрыск», созданной в ЮУрГУ. Установка позволяет исследовать изменение длины и угла конуса струи в ограниченном объеме между двумя пластинами, моделирующем

форму открытой камеры сгорания транспортного дизеля типа 12 ЧН 15/16. Этот дизель имеет систему топливоподачи типа *Common Rail*. Исследован процесс впрыскивания топлива при различных давлениях в топливном аккумуляторе 100, 130 и 165 МПа и продолжительностях управляющего импульса от 0,5 до 3 мс. Для обеспечения в камере дизеля плотности среды, равной $35,5 \text{ кг/м}^3$, давление сжатого воздуха в камере постоянного объема поддерживалось на уровне 30 бар. В результате высокоскоростной видеосъемки установлено, что при взаимодействии головной части топливной струи с наклонной поверхностью пластины происходит частичное отражение струи. На основе полученных результатов построены взаимные положения струи и профиля днища поршня в процессе впрыска топлива. Показано, что при положении поршня после 10 градусов п.к.в. до верхней мертвой точки (ВМТ) струя достигает днища поршня, что приводит к снижению топливной экономичности при форсировании дизеля.

В докладе В.Г. Камалтдинова, В.А. Маркова, И.О. Лысова, И.В. Тянюгина (ЮУрГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Исследование влияния противодействия на изменение длины и угла конуса топливных струй в камере постоянного объема» исследована динамика изменения указанных параметров струй. При испытаниях на упомянутой установке «Впрыск» продолжительность управляющего импульса составляла 1,5 мс, давление в топливном аккумуляторе было равно 165 МПа при различных значениях давления среды в камере постоянного объема от 1 до 30 кгс/см². Установлено, что при давлении в камере 1 кгс/см² в момент времени 0,6 мс от начала впрыска средняя длина струй составляет 39 мм, а при давлении 30 кгс/см² уменьшается до 16 мм. При тех же условиях в момент времени 1,2 мс средняя длина струй равна соответственно 67 и 42 мм. Результаты испытаний показали, что по мере увеличения давления в камере постоянного объема средняя длина струй может уменьшаться в 3 раза. При этом средний угол конуса топливных струй увеличивается с 12–14 до 30°.

В.А. Марков, В.Г. Камалтдинов, А.А. Савастенко, И.Н. Афтени (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, РУДН) представили доклад «Биогаз — перспективное газомоторное топливо для дизелей». Рассмотрена организация рабочего процесса дизеля на биогазе с запальной дозой метилового эфира рапсового масла (МЭРМ). Реализация такого газодизельного цикла позволяет полностью отказаться от топлив, получаемых из ископаемых сырьевых ресурсов (нефть и природный газ), и заместить их биотопливами. Представлены результаты испытаний дизеля типа 4 Ч 11/12,5 на биогазе с запальной дозой МЭРМ. Показано, что в этом случае имеет место лучшее качество

процесса смесеобразования, что приводит к заметному снижению дымности ОГ, особенно на режимах с полной нагрузкой. Если на режимах с малыми и средними нагрузками (при мощности двигателя менее 23...24 кВт) дымность ОГ в дизельном и газодизельном циклах соизмерима, то на режимах с полной нагрузкой (при мощности 33,7...34,4 кВт) она составила 57,3 % по шкале Хартриджа в дизельном цикле и 8,7 % по шкале Хартриджа в газодизельном цикле. Таким образом, на этих режимах переход от дизельного цикла к газодизельному приводит к снижению дымности ОГ в 6,6 раза. При испытаниях отмечена тенденция меньшего содержания оксидов азота в ОГ в газодизельном цикле по сравнению с дизельным циклом. На режиме с полной нагрузкой реализация газодизельного цикла снижает выбросы оксидов азота примерно на 15 %.

В.П. Антипин, В.Д. Валяжонков, М.Я. Дурманов, В.Н. Куликов (Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет) выступили с докладом «Обоснование закона приращения цикловой подачи топлива в двигатель по характеристике постоянной мощности». Отмечено, что при проектировании механических коробок перемены передач (КПП) для автотракторных средств (АТС) ступени КПП стремятся расположить по закону гиперболы в целях поддержания постоянной мощности двигателя на всех режимах. Установлено, что чем больше ступеней в КПП, тем меньше запас мощности двигателя, необходимый для преодоления временно возросшей перегрузки без переключения на ступень КПП с повышенным передаточным числом. Предложено в систему управления подачей топлива заложить программу приращения цикловой подачи по закону гиперболы, в которой выполнено деление дуги гиперболы на отрезки (на ступени КПП) и расчет соответствующих передаточных чисел трансмиссии. Это позволит уменьшить число ступеней в КПП, обеспечить плавность хода, снизить запас мощности двигателя и утомляемость оператора в сложных условиях функционирования АТС. В качестве примера рассмотрен трактор К-744Р-05, работающий в транспортном режиме. При скорости его движения 3,56 м/с с передаточным числом 35,80 наблюдается эффект «галопирования». После пересчета штатной 16-ступенчатой КПП на 12-ступенчатую и работе на третьей передаче с передаточным числом 32,42 при скорости движения 3,93 м/с эффект «галопирования» исчезает. Как следствие, уменьшаются на 2,6 % энергозатраты на преодоление временных перегрузок.

В докладе П.Р. Вальехо Мальдонадо, В.А. Маркова, В.Л. Трифонова (Московский политехнический университет, МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Сравнительный анализ топливной экономичности дизеля и двигателя с искровым зажиганием и расслоением заряда» рассмотрены особенности ор-

ганизации рабочего процесса бензиновых двигателей. Показана возможность улучшения топливной экономичности этих двигателей при организации расслоения рабочего заряда. Проведено сравнение показателей топливной экономичности бензиновых двигателей с расслоением рабочего заряда и дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива. На номинальном режиме топливная экономичность этих двух типов двигателей оказалась соизмеримой, а на режимах с коэффициентом избытка воздуха, равным 3–4 единицам, дизель имеет на 10...15 % лучшую топливную экономичность по сравнению с бензиновым двигателем с расслоением рабочего заряда. Сравнительный анализ характеристик бензинового двигателя с расслоением и без расслоения рабочего заряда показывает, что на номинальном режиме (при коэффициенте избытка воздуха, близком к единице) их мощностные и топливно-экономические показатели близки между собой. Но при этом на режимах с частичной нагрузкой реализация расслоения рабочего заряда позволяет повысить на 10...15 % топливную экономичность.

В докладе П.Р. Вальехо Мальдонадо, В.А. Маркова, В.Л. Трифонова (Московский политехнический университет, МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Система многофазной топливоподачи для дизеля» показана целесообразность реализации многофазного впрыскивания. Рассмотрены различные законы подачи топлива в цилиндры дизеля. Отмечено влияние такой характеристики топливоподачи на показатели токсичности ОГ дизеля. Предложена система многофазной подачи топлива автотракторного дизеля, обеспечивающая впрыскивание основной дозы топлива на такте сжатия при нахождении поршня вблизи ВМТ, а впрыскивание дополнительных порций — в конце такта выпуска и в начале такта впуска. Предварительное впрыскивание обеспечивает лучшую подготовку рабочей смеси с основной дозой топлива к процессу сгорания. Впрыскивание топлива на такте выпуска позволяет повысить температуру ОГ и обеспечить более полное дожигание продуктов сгорания в термическом нейтрализаторе, установленном в выпускной системе дизеля.

П.Р. Вальехо Мальдонадо, Н.Д. Чайнов (Московский политехнический университет, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили доклад «Разработка методики уравнивания 12-цилиндрового четырехтактного двигателя типа *W* дезаксиальным кривошипно-шатунным механизмом и равномерным чередованием вспышек». Отмечено, что наряду с необходимостью повышения экономичности всех типов двигателей снижение шума и вибраций является важнейшим требованием к конструкции современного поршневого двигателя. В работе рассматривается уравнивание сверхкомпактного 12-цилиндрового четырехтактного двигателя,

представляющего собой V-образную компоновку из двух 6-цилиндровых двигателей схемы VR, с углом развала блоков цилиндров этих двигателей 72° , углом развала цилиндров в каждом блоке 15° , дезаксиальным кривошипно-шатунным механизмом и равномерным чередованием вспышек. Приведены формулы, позволяющие описать и проанализировать возникающие в таком двигателе продольные моменты сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс для любого заданного значения угла развала блоков цилиндров, угла развала цилиндров в блоке, отношения радиуса кривошипа к длине шатуна и относительного дезаксиала оси цилиндра. Предложен способ уравнивания неуравновешенных моментов сил инерции вращающихся и возвратно-поступательно движущихся масс.

В докладе В.А. Маркова, С.И. Каськова, С.С. Лободы (МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Оптимизация состава смесей нефтяного дизельного топлива с растительными маслами» отмечено, что использование биотоплив позволяет обеспечить замещение нефтяных моторных топлив и уменьшить выбросы в атмосферу вредных веществ с ОГ дизелей. Показана целесообразность применения смесевых биотоплив — смесей нефтяного дизельного топлива (ДТ) и растительных масел. Проведено исследование, направленное на оптимизацию состава таких биотоплив. Рассмотрены смеси нефтяного ДТ с льняным, горчичным и рыжиковым маслами. Предложена методика оптимизации этих смесей, базирующаяся на определении обобщенного критерия оптимальности, вычисляемого в виде суммы частных критериев, характеризующих концентрацию в ОГ нормируемых токсичных компонентов. Весовые коэффициенты этих частных критериев учитывают токсикологическую значимость каждого компонента. Проведены оптимизационные расчеты состава биотоплива для дизеля типа Д-245.12С. Показано, что с увеличением содержания указанных масел в смеси с нефтяным ДТ параметры токсичности ОГ улучшаются, но даже небольшая добавка растительного масла в нефтяное ДТ значительно улучшает эти параметры. Минимальное значение обобщенного критерия оптимальности, равное 0,851, достигнуто при работе на смеси 91 % нефтяного ДТ и 9 % льняного масла.

В.А. Марков, С.Н. Девянин, Е.Ф. Поздняков, Са Бовэнь (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, ЗАО «Форант-Сервис») представили доклад «Исследование влияния геометрии проточной части распылителя дизельной форсунки на параметры процесса топливоподачи». Предложено несколько конструкций распылителей, в которых на хвостовике иглы выполнены дополнительные гидравлические сопротивления. В качестве базового выбран серийный распылитель типа 171.07.00 Алтайского завода прецизионных изделий

(АЗПИ), которым оснащена форсунка типа ФДМ-22 производства Ногинского завода топливной аппаратуры. Для оценки влияния разработанных конструкций хвостовика иглы на течение топлива в распылителях проведены расчетные исследования течения ДТ марки Л (летнее) по ГОСТ 305–82 с помощью ПК *Fluent*. По результатам исследований выбрана оптимальная конструкция распылителя форсунки.

В докладе В.А. Маркова, А.А. Савастенко, Э.А. Савастенко, А.Д. Денисова, В.А. Неверова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ, РУДН) «Об использовании водотопливных эмульсий в автотракторных дизелях» отмечено, что одним из наиболее эффективных методов снижения выбросов оксидов азота с ОГ двигателей внутреннего сгорания является подача воды в цилиндры. Рассмотрены различные способы подачи воды и показана перспективность использования в качестве топлива для дизелей водотопливных эмульсий (ВТЭ). Отмечено, что работа дизелей на ВТЭ позволяет не только уменьшить эмиссию оксидов азота, но и снизить дымность ОГ и выброс твердых частиц, а также при определенных условиях улучшить показатели топливной экономичности. Рассмотрены особенности рабочего процесса при подаче воды в камеру сгорания дизеля. Проведены расчетные исследования рабочего процесса и исследованы возможности улучшения экологических показателей дизеля путем применения ВТЭ. Проведена термодинамическая оценка эффекта улучшения показателей топливной экономичности дизеля, работающего на ВТЭ. Сделан вывод об эффективности использования ВТЭ в автотракторных дизелях.

В.А. Марков, С.Н. Девянин, Е.Ф. Поздняков, В.И. Шатров, А.Д. Денисов, И.В. Кошевой (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, ЗАО «Форант-Сервис») представили доклад «Исследование работы дизеля на эмульсии рапсового масла и воды». Показаны преимущества использования эмульгированных топлив в дизелях. Проведен сравнительный анализ физико-химических свойств нефтяного ДТ и эмульсии, содержащей 90 % рапсового масла (РМ) и 10 % воды. Проведенные испытания дизеля типа Д-243 показали, что перевод дизеля с нефтяного ДТ на эмульсию 90 % РМ и 10 % воды на режимах с большой нагрузкой сопровождается уменьшением содержания в ОГ оксидов азота на 8...13 % и снижением дымности ОГ на 26...42 %. Во всем диапазоне исследованных нагрузочных режимов такой переход позволяет снизить концентрацию в ОГ несгоревших углеводородов в 1,5–2,5 раза. Отмеченный при испытаниях дизеля Д-243 на эмульгированном топливе рост выбросов монооксида углерода легко устраняется путем установки в выпускной системе двигателя каталитического нейтрализатора.

В докладе С.М. Крутиёва, В.А. Зяброва, В.С. Епифанова (МГАВТ, Москва, филиал ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург) «О результатах экспериментального исследования влияния состава воздушного заряда на экологические показатели двигателя» изложены экспериментальные результаты по кратковременному форсированию судовых энергетических установок (СЭУ) путем подачи кислорода в цилиндры двигателя. Испытания дизеля типа 6 Ч 18/22 показали, что подача кислорода во впускной коллектор двигателя является эффективным способом кратковременного повышения мощности СЭУ без применения каких-либо сложных устройств и изменения конструкции двигателя. Отмечено, что кроме повышения мощности подача кислорода снижает расход топлива и выбросы сажи. Так, на режиме с полной нагрузкой при подаче 25 % кислорода удельный эффективный расход топлива снизился на 7,5 % по сравнению с работой с воздухом, а при подаче 30 % кислорода — до 10 %. К негативным последствиям такого метода форсирования двигателя относится повышение эмиссии оксидов азота NO_x . Для снижения выброса NO_x реализована подача воды во впускной коллектор в целях снижения максимальных температур в цилиндре дизеля. Экспериментальные исследования показали, что подача воды на впуске позволила снизить выброс NO_x в среднем на 44 % при 25%-ной подаче кислорода и на 46 % при 30%-ной подаче кислорода. При отключении подачи кислорода и впрыске воды на впуске концентрация оксидов азота уменьшилась всего на 15...18 %.

В докладе М.А. Савельева, В.А. Маркова, А.Е. Рассохина (РВВДКУ имени генерала армии В.Ф. Маргелова, Рязань, МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Тепло-энергетическая оптимизация работы одноцилиндровых поршневых автомобильных компрессоров» проведена оценка эффективности работы компрессора при прогреве двигателя в условиях низких температур. Анализ параметров работы компрессора модели КамАЗ 18.3509015 показал, что повышение противодавления на выпуске из компрессора от 0,6 до 1 МПа увеличивает затраты мощности на его привод на 5,1... 13,1 %. Это сопровождается падением производительности компрессора на 5,7...10,4 %. При прогреве ДВС на режиме холостого хода при частоте вращения 1400 мин⁻¹ и повышении противодавления от 0,6 до 1 МПа производительность компрессора снижается от 265 до 245 л/мин, а потребляемая мощность возрастает от 2,40 до 2,63 кВт. Понижение температуры окружающей среды от 0 до -40 °С снижает температуру воздуха на выходе из компрессора на 54 °С (на 10,8 %). Мощность, затрачиваемая на привод компрессора при пуске и прогреве ДВС, может составлять до 8,2 % индикаторной мощности.

Управление работой компрессора с использованием электромагнитного выпускного клапана позволяет уменьшить момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала на режимах пуска и прогрева двигателя, а также обеспечить сокращение времени выхода на режим с полной нагрузкой за счет повышения теплоотдачи в систему охлаждения.

А.Е. Рассохин, М.А. Савельев, Ю.А. Заяц (РВВДКУ имени генерала армии В.Ф. Маргелова) представили доклад «Ускорение прогрева ДВС в условиях низких температур регулированием теплопередачи в теплоноситель». Отмечено, что для современных дизелей температура принятия двигателем нагрузки находится в диапазоне изменения температуры охлаждающей жидкости от +40 до +70 °С. Показано, что при прогреве дизеля КамАЗ-740.30-260 от -40 °С и достижении охлаждающей жидкостью температуры +40 °С температура масла составляет +57 °С. Отмечено, что жидкостная система охлаждения имеет инерционность, замедляющую скорость прогрева двигателя. При прогреве упомянутого дизеля от -20 до +40 °С система охлаждения с антифризом типа ТОСОЛ поглощает более 4 МДж теплоты. При использовании в качестве теплоносителя воды количество поглощаемой теплоты увеличивается на 12 %, а при охлаждении двигателя воздухом количество поглощенной теплоты на несколько порядков меньше. Таким образом, для более быстрого достижения температур принятия нагрузки двигателем возможна разработка алгоритмов управления изменением вида теплоносителя. В частности, на режимах прогрева двигателя целесообразно использовать в качестве теплоносителя воздух, а при достижении рабочих температур — охлаждающую жидкость. При реализации данного метода управлять теплоотводом можно путем изменения вида теплоносителя и регулирования скорости циркуляции теплоносителя и его температуры.

М.А. Савельев, В.А. Марков, Ю.А. Заяц, А.В. Ткаченко, М.К. Сибиляев (РВВДКУ имени генерала армии В.Ф. Маргелова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИИЦ АТ 3 ЦНИИ МО РФ, г. Бронницы) представили доклад «Исследование критериев и обоснование направлений обеспечения технической готовности двигателей к принятию нагрузки в условиях низких температур». Определены температурные критерии надежного пуска ДВС: подогрев аккумуляторной батареи (АКБ) до температуры от -10 до -20 °С, подогрев масла до температуры от -20 до -30 °С, подогрев воздуха на впуске до температур +20...+30 °С. Среди эффективных методов обеспечения надежного пуска выделены подогрев АКБ и использование дублирующих источников энергии (суперконденсаторов, молекулярных накопителей, пневмостартерного и воздушного пусков); подогрев воздуха

на впуске, повышение эффективности средств предпускового прогрева двигателя; разработка и реализация способов физико-химической подготовки топлива и масла.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Архаров А.М., Афанасьев В.Н., ред. Теплотехника. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
- [2] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-14. Двигатели внутреннего сгорания. М., Машиностроение, 2013.
- [3] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Системы топливоподачи и управления дизелей. М., Легион-Автодата, 2005.
- [4] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
- [5] Александров А.А., Марков В.А., ред. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания. М., ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012.

Марков Владимир Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Шатров Виктор Иванович — канд. техн. наук, ведущий инженер НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марков В.А., Шатров В.И. Современное состояние и перспективы развития систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 1, с. 101–109. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-1-101-109

CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF AUTOMATED CONTROL AND ADJUSTMENT SYSTEMS IN THERMAL POWER PLANTS

V.A. Markov
V.I. Shatrov

vladimir.markov58@yandex.ru
markov58@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper substantiates the importance of research dealing with improving automated control and adjustment systems in thermal power plants. The main objects of our investigation are control and adjustment systems found in internal combustion

Keywords

Thermal power plants, internal combustion engines, diesel engines, automated control systems, automated adjustment systems

engines. We show how far the fuel efficiency and exhaust gas toxicity indices can improve in such systems. We consider the scope for further improvement of engine power characteristics and dynamic parameters by means of control and adjustment systems. We estimated the degree to which automated control and adjustment systems in thermal power plants are advanced currently and drew conclusions regarding their development prospects. We considered the primary directions for investigations in the field of fuel injection equipment for diesel engines, their work cycles, and adapting engines to running on various alternative fuels, including biofuels

Received 23.03.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Arkharov A.M., Afanas'yev V.N., eds. *Teplotekhnika [Thermal engineering]*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011.
- [2] Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A., eds. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-14. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Mechanical engineering encyclopaedia. Vol. IV-14. Combustion engines]*. Moscow, Mashinostroenie, 2013 (in Russ.).
- [3] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Sistemy toplivopodachi i upravleniya dizeley [Fuel delivery and control systems for diesel engines]*. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2005.
- [4] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley [Exhaust emissions toxicity of diesel engines]*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002.
- [5] Aleksandrov A.A., Markov V.A., eds. *Al'ternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Alternative fuels for internal combustion engines]*. Moscow, OOO NITs "Inzhener" Publ., OOO "Oniko-M" Publ., 2012.

Markov V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Shatrov V.I. — Cand. Sc. (Eng.), Leading Engineer, Scientific Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Markov V.A., Shatrov V.I. Current State and Development Prospects of Automated Control and Adjustment Systems in Thermal Power Plants. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 1, pp. 101–119 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2019-1-101-119