

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

В.А. Марков

markov58@bmstu.ru

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

Аннотация

Рассмотрены основные направления совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. Показано, что в современных стационарных и мобильных теплоэнергетических установках применяются в основном поршневые двигатели внутреннего сгорания. Отмечено, что оснащение установок системами автоматического управления и регулирования обеспечивает наиболее эффективное протекание процессов в различных системах комбинированных энергетических установок и удовлетворение современных жестких требований к их мощностным и динамическим показателям, к показателям топливной экономичности и токсичности отработавших газов. На современном этапе развития теплоэнергетических установок с двигателями внутреннего сгорания наиболее важной задачей становится необходимость улучшения показателей токсичности отработавших газов. Рассмотрены методы и средства улучшения указанных показателей. В целях сокращения выбросов вредных веществ в атмосферу расширяется применение в теплоэнергетических установках различных альтернативных топлив. Для снижения парникового эффекта целесообразно использовать в теплоэнергетических установках безуглеродные и низкоуглеродные моторные топлива, такие как водород, аммиак и природный газ, а также биотоплива на основе этилового спирта и растительных масел

Ключевые слова

Теплоэнергетическая установка, двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, бензиновый двигатель, система автоматического управления, система автоматического регулирования, альтернативные топлива

Поступила 24.05.2024

Принята 15.01.2025

© Автор(ы), 2025

*Работа подготовлена по материалам докладов ВНТК
имени профессора В.И. Крутова (31.01.2024)*

Введение. Теплоэнергетические установки разных типов широко используются в различных отраслях экономики — промышленности, транспорте, сельском хозяйстве [1, 2]. Теплоэнергетические установки преимущественно оснащаются поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Их эффективная работа обеспечивается только при оснащении современными системами автоматического регулирования и автоматического управления (САР и САУ) [3–8]. Это важно при совершенствовании мобильных энергетических установок, работающих в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов. Системы управления и регулирования вносят коррективы в работу теплоэнергетических установок при изменении режима их работы, а также при изменении условий эксплуатации — при смене атмосферных условий, свойств применяемого топлива, ряда других факторов. Указанные САР и САУ обеспечивают наиболее эффективное протекание процессов в различных системах комбинированных энергетических установок и удовлетворение современных жестких требований к мощностным и динамическим показателям этих установок, к показателям топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ).

Среди экологических показателей в первую очередь следует выделить нормируемые токсичные выбросы — эмиссию оксидов азота, монооксида углерода, несгоревших углеводородов и твердых частиц, основным компонентом которых является сажа. В связи с прогнозируемым переходом к углеродно-нейтральной энергетике особую значимость приобретают выбросы парниковых газов (в первую очередь углекислого газа), а со стремлением снизить техногенное воздействие на окружающую среду и ввести жесткие требования к экологическим показателям теплоэнергетических установок все более широкое использование в ДВС находят различные альтернативные топлива [9–11]. Кардинальное улучшение экологических показателей ДВС возможно при использовании безуглеродных и низкоуглеродных моторных топлив (МТ), в качестве которых рассматриваются водород, аммиак, газомоторные топлива (природный и сжиженный нефтяной газ), различные биотоплива [12–16].

В последнее время все большее внимание привлекает использование в качестве МТ водорода и аммиака. Водород рассматривается как наиболее перспективный энергоноситель [17–21]. Но при этом аммиак как МТ имеет ряд преимуществ по сравнению с водородом, среди которых возможность его относительно безопасного хранения и использования, бездетонационное сгорание в цилиндрах двигателя [22–26]. Использование аммиака вместо водорода в целом решает проблему хранения и транспортировки топлива на борту транспортного средства.

Указанные газомоторные топлива — природный газ и сжиженный нефтяной газ — имеют примерно в 2 раза меньшую стоимость по сравнению с нефтяными МТ. Их использование позволяет снизить выбросы сажи с ОГ двигателя, углекислого газа, обеспечить пониженные расход моторного масла и износ деталей двигателя. При этом выброс углекислого газа снижается на 15...20 % [9, 12]. Среди биотоплив необходимо выделить топлива, получаемые из растительных масел (сами масла, их эфиры, смесевые топлива), и различные спиртовые топлива (этанол, метанол, производные спиртов — эфиры) [10, 16]. Первые используются в дизельных двигателях, а вторые — преимущественно в бензиновых двигателях. Использование биотоплив позволяет снизить техногенное воздействие транспортного сектора на окружающую среду и расширить сырьевую базу для получения МТ.

Среди других важных направлений совершенствования САУ и САР теплоэнергетических установок с ДВС следует выделить совершенствование процесса топливоподачи дизельных двигателей, что позволит улучшить качество процессов смесеобразования и сгорания топлива, и поддержание подачи в требуемом соотношении в цилиндры бензинового двигателя топлива и воздуха в целях наиболее полного и качественного сгорания топлива. Решение этих задач обеспечивает требуемые значения мощностных и динамических показателей теплоэнергетических установок с ДВС, показателей их топливной экономичности и токсичности ОГ.

Методы исследования теплоэнергетических установок, их САР и САУ. При проведении исследований теплоэнергетических установок применялись известные методы и методики, при создании и исследовании САР и САУ — различные подходы: моделирование с использованием линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, полунатурное моделирование, нейронные сети для определения алгоритмов работы таких систем и др. [27–30]. Среди аналитических подходов можно выделить расчетные исследования, выполненные с привлечением известных зарубежных и отечественных программных комплексов (ПК) — AVL BOOST, AVL CRUISE M, Converge CFD, MathCAD, Дизель-ПК, Впрыск. Эти комплексы разработаны с использованием современного математического аппарата термодинамики, теплофизики, гидро- и газодинамики, теории автоматического регулирования и управления, методов оптимизации параметров теплоэнергетических установок. Экспериментальные исследования выполнены как на безмоторных установках, так и на одноцилиндровых и полноразмерных двигателях. При проведении экспериментов использовались хорошо апробированные методики исследований и современные

измерительные средства. Достоверность экспериментальных данных проверялась путем их сопоставления с данными результатов экспериментов, выполненных другими авторами, а также с результатами аналитических и расчетных исследований.

Основное содержание выполненных исследований. Во вступительном слове председательствующий профессор Кузнецов А.Г. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) отметил значительную роль САУ и САР при обеспечении современных требований, предъявляемых к теплоэнергетическим установкам различных типов. В первую очередь это относится к мобильным энергетическим установкам, работающим в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов и при преобладании неустановившихся режимов работы. Причем особую значимость приобретают требования к экологическим показателям этих установок — токсичности ОГ и выброса в атмосферу углекислого газа, шумности работы.

Кузнецов А.Г., Харитонов С.В. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрели особенности и проблемы регулирования воздухообеспечения газовых двигателей. Отмечено, что в настоящее время в АО «Коломенский завод» ведутся работы по созданию газопоршневой электростанции типа 1-9ГМГ мощностью 900 кВт с дизельным двигателем типа Д49 (8 ЧН 26/26) и когенерацией теплоты. Газовый двигатель этой установки работает в достаточно узком диапазоне значений коэффициента избытка воздуха, поэтому в состав САУ двигателем входит САР воздухообеспечения. На двигателе установлен отечественный нерегулируемый турбокомпрессор типа ТК18В-59. Воздухообеспечение регулируется воздушной заслонкой, по компоновочным соображениям расположенной между компрессором и охладителем наддувочного воздуха. Заслонка входит в состав интегрированного привода ИТВ200 с шаговым двигателем и управлением от контроллера Vari Step 3. Данное решение широко используется в мировой практике. В ходе выполнения проекта выявлен ряд особенностей и проблем, возникающих при разработке САР воздухообеспечения. Так, по сигналу датчика детонации контроллер может перейти в аварийный режим, полностью перекрывая подачу воздуха, что приводит к остановке двигателя. Привод заслонки расположен в зоне высоких температур, поэтому происходит перегрев обмоток шагового двигателя с последующим выходом его из строя. Для повышения надежности работы привода воздушной заслонки предложено перенести его в зону с более низкой температурой и заменить шаговый двигатель на позиционный привод с червячным редуктором. Это препятствует проворачиванию заслонки при внешних воздействиях.

Овчинников С.В., Антошин Р.О., Дойников К.В., Тихомиров М.В., Крутов В.В., Шаров Д.М., Хрящёв Ю.Е. (ООО «Электротехнический завод ЭЛЗА», ЯГТУ, г. Ярославль) исследовали проблемы разработки электромагнитного исполнительного механизма для САУ и САР поршневыми двигателями. Проанализированы известные подходы к разработке электрических исполнительных механизмов для таких систем, используемых в ДВС. Рассмотрены тяговые характеристики электромагнитов этих механизмов и особенности позиционирования якоря. Разработан электромагнитный пропорциональный поворотный исполнительный механизм для применения в САУ и САР поршневых двигателей. Его конструкция является продолжением разработок, аналогичных хорошо известным разработкам поворотного электромагнитного исполнительного механизма типа ЭМП01-30 с активным ротором. Осуществлена параметрическая оптимизация такого двухполюсного исполнительного механизма для привода дроссельной заслонки в ДВС. Новую конструкцию отличает расширенный рабочий диапазон режимов, повышенная энергоэффективность, а также технологичность, позволяющая снизить себестоимость электромагнитного исполнительного механизма. Улучшение его технических характеристик достигнуто за счет магнитного шунтирования в дисках якоря с помощью воздушных пазов таким образом, чтобы значение магнитного крутящего момента при увеличении угла поворота ротора оставалось постоянным.

Гололобов Ю.А., Киселёв М.А., Марчук А.А., Душкин П.В., Кремнев В.В., Королёв П.А. (НАМИ, МАДИ) представили методику комплексного управления коэффициентом избытка воздуха бензинового двигателя. При выборе оптимизированных значений этого коэффициента учитывались требования к мощностным и топливо-экономическим показателям ДВС, токсичности ОГ, защите компонентов выпускной системы двигателя — турбины, нейтрализатора ОГ и др. Основная цель исследования — повышение точности поддержания заданного значения коэффициента избытка воздуха путем организации обратной связи с использованием λ -зонда. Отмечено, что отклонение значения коэффициента избытка воздуха от его требуемого значения обусловлено динамическими процессами в системах топливоподачи и воздухообеспечения, а также рядом конструктивных и эксплуатационных факторов. Предложенная методика предполагает использование пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора топливоподачи, модели прогноза состава смеси в выпускной системе, искусственной нейронной сети типа «дерево локально-линейных моделей».

Преимуществами использования предложенной методики являются повышение запаса устойчивости системы регулирования при изменении уставки коэффициента избытка воздуха за счет прогноза состава смеси в выпускной системе и возможность сохранения работоспособности системы при отсутствии информации от λ -зонда за счет адаптаций (в первую очередь — при холодном запуске двигателя и пропусках воспламенения).

Гофман М.Д., Стряпунин А.С., Шатров М.Г., Яковенко А.Л. (МАДИ) представили результаты моделирования переходных процессов дизельного двигателя с использованием ПК AVL CRUISE M. Отмечено, что в настоящее время актуальной задачей при исследованиях структурного шума ДВС является моделирование его неустановившихся режимов в составе транспортного средства. Основная проблема заключается в необходимости учета переменной внешней нагрузки и других факторов, влияющих на рабочий процесс двигателя. Для моделирования работы ДВС в составе транспортного средства применялся ПК AVL CRUISE M, используемый для исследования структурного шума. Рассмотрены особенности и направления применения этого ПК. Представлены модели легкового и грузового автомобилей с дизельным двигателем, а также модель дизельного двигателя типа 4 ЧН 11/12,5 при работе на стенде. Приведены результаты моделирования переходного процесса разгона легкового автомобиля по ГОСТ Р 41.51–2004, а также результаты исследования влияния передачи трансмиссии при разгоне грузового автомобиля на шум дизельного двигателя от рабочего процесса. Выполнено моделирование разгона указанного дизельного двигателя при постоянной внешней нагрузке. По результатам моделирования получено, что при разгоне от 1000 до 2400 мин⁻¹ уровень звуковой мощности исследуемого двигателя увеличился на 11 дБ. При этом основная доля звуковой мощности по спектру частот сосредоточена в диапазоне 400...2000 Гц.

Нгуен Ван Зунг, Дунин А.Ю., Шатров М.Г., Голубков Л.Н., Душкин П.В., Филиппов В.Р. (МАДИ) рассмотрели особенности применения комбинированной энергетической установки (КЭУ) при переводе ДВС на альтернативное топливо для снижения выбросов с ОГ углеродсодержащих соединений. Отмечено, что стремление к снижению отрицательного воздействия транспорта на окружающую среду заставляет производителей транспортных средств совершенствовать существующие и искать новые направления снижения доли токсичных веществ в ОГ двигателей с искровым зажиганием. Одно из таких направлений — это применение топлив, не содержащих в своем составе углерод. В качестве таковых рассмотрены водород и аммиак. Использование водорода сопряжено с при-

менением дорогостоящих технологий, не гарантирующих полную безопасность транспортного средства. С этой точки зрения более привлекательным представляется использование аммиака в качестве МТ для указанных двигателей. Для компенсации потери мощности двигателя, вызванной разностью теплоты сгорания бензина и аммиака, при его работе на режимах с высокой нагрузкой предлагается применять эти двигатели в составе КЭУ. При этом возникает необходимость выбора рационального сочетания требуемой мощности двигателя, работающего на аммиаке, мощности электрических устройств (генератора и электродвигателя), емкости аккумуляторной батареи. Такой выбор влияет на массу транспортного средства и режимы работы его двигателя при движении автомобиля по заданному циклу. Применение указанной энергетической установки с оптимизированной структурой позволяет выбрать рациональное число работающих цилиндров, снизить расход топлива и выбросы вредных веществ с ОГ в атмосферу.

Петров А.М., Конюшков Д.С., Цапурин Я.С., Шевченко Н.М., Антипин М.В. (МАДИ) исследовали особенности разработки отечественной системы управления для двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндр. Эти системы имеют ряд преимуществ и особенностей в алгоритмах управления. К преимуществам можно отнести гибкое управление процессом впрыскивания бензина, возможность обеспечения требуемых экологических показателей, высокую топливную экономичность. Особенности управления работой таких топливных систем следующие. В связи с тем, что топливные насосы высокого давления (ТНВД) таких систем чаще всего приводятся от распределительного вала двигателя, импульсы управления клапаном ТНВД синхронизированы с положением этого вала. Топливо может впрыскиваться как на такте впуска, так и на такте сжатия, возможно многократное впрыскивание топлива. Для исследования возможностей управления системами непосредственного впрыскивания бензина разработан программно-аппаратный мобильный диагностический комплекс, предоставляющий широкие возможности для сбора и последующей обработки данных, необходимых для работы САУ. В текущей версии этого комплекса предусмотрено 32 независимых канала: 16 двухуровневых и 16 аналоговых, четыре из которых зарезервированы для индицирования процессов, происходящих в двигателе и его системе топливоподачи. Все записанные данные синхронизированы с положением коленчатого вала двигателя с возможностью последующего использования этих данных с шагом до 0,1 град п.к.в.

Филиппова Е.М., Николаев С.Е., Ахметжанова Э.У., Фатиев Е.И., Брылов Н.Р. (МАДИ) представили результаты совершенствования модели развития струи топлива, впрыскиваемого электрогидравлической форсункой автотракторного дизельного двигателя. Разработана уточненная математическая модель развития струи впрыскиваемого топлива, которая объединяет расчет цикла дизеля и гидродинамический расчет процесса в системе топливоподачи с учетом ее конструкции без применения относительно сложных ПК CFD. Уточнение математической модели топливной струи связано с необходимостью учета интенсификации процесса впрыскивания с повышением давления впрыскивания более 100 МПа. При этом возникает проблема согласования геометрии развивающейся струи топлива с формой камеры сгорания, которая изменяется при перемещении поршня. Кроме того, необходим учет момента начала и развития процесса испарения топлива во время впрыскивания. В качестве объекта исследования выбран дизельный двигатель типа 4 ЧН 10/11 с электрогидравлической форсункой с шестью распыливающими отверстиями. Исследования динамики развития топливных струй показали, что с повышением давления впрыскивания от 50 до 150 МПа происходит увеличение на 19 % дальности струи. При этом увеличивается крутизна переднего фронта дифференциальной характеристики впрыскивания с переносом максимального значения интенсивности подачи ближе к началу топливоподачи.

Синявский В.В., Кремнев В.В., Пронченко Г.В., Широков И.А. (МАДИ) выполнили анализ причин улучшения показателей дизельных двигателей семейства КамАЗ при переходе от V-образной восьмицилиндровой компоновки V8 к рядной шестицилиндровой компоновке Р6. Приведены характеристики дизелей грузовых автомобилей, выпускаемых ведущими мировыми и отечественными двигателестроительными фирмами (Volvo, Cummins, Mercedes-Benz, ПАО «КАМАЗ», ЯМЗ): компоновка, номинальная частота вращения, мощностные показатели, рабочий объем, степень сжатия. Проанализированы причины использования на дизельных двигателях грузовых автомобилей семейства КамАЗ компоновок V8 и Р6. Приведены схемы компоновки двигателей и порядок работы их цилиндров. Рассчитаны показатели дизелей КамАЗ-740 (V8) с двумя турбокомпрессорами типа ТКР-7 и КамАЗ-910 (Р6) с одним турбокомпрессором типа ТКР-9, имеющих практически одинаковые рабочий объем и протекание характеристики мощности на режимах внешней скоростной характеристики (BCX) с использованием ПК AVL BOOST. Показано, что при работе дизельных двигателей на режимах BCX изменение компоновки с V8

на Р6 привело к снижению на 2...4 % относительных потерь теплоты в стенки КС, увеличению на 12...22 % КПД турбокомпрессора, снижению на 12...15 % работы выпуска. При переходе от компоновки V8 к Р6 эти факторы позволили увеличить на 4...8 % топливную экономичность двигателя.

Савастенко А.А., Савастенко Э.А., Марков В.А. (МАДИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели исследования особенностей конструкции и работы двухпружинных форсунок топливной аппаратуры (ТА) дизельных двигателей. Отмечена актуальность применения в России традиционной ТА с механическими САР. В связи с известными ограничениями использования зарубежных образцов ДВС и их электронно-управляемых систем топливоподачи, в сельскохозяйственной технике и в настоящее время используются двигатели, оснащенные механическими САР. Кроме того, использование этих систем в отдаленных районах РФ, где двигатели заправляются топливами с утяжеленным и широким фракционным составом, сопровождается пагубным влиянием этих топлив на электронные системы топливоподачи, выпускаемые зарубежными фирмами. Это системы типа Common Rail, электронно-управляемые насос-форсунки и индивидуальные ТНВД с электронным управлением. Проведен анализ конструкций существующих двухпружинных форсунок современных дизелей, обеспечивающих многократное впрыскивание топлива. Показано, что особенностью этих конструкций является обязательное наличие соответствующих приспособлений и калибров, необходимых для регулировок давления открытия по основному впрыскиванию топлив и предварительного хода иглы форсунки по первому впрыскиванию. Двухпружинные механические форсунки для обеспечения двухстадийной подачи топлива разработали такие ведущие зарубежные фирмы, как R. Bosch, Denso, Zexel, Delfi. На Ярославском заводе топливной аппаратуры созданы экспериментальные образцы таких форсунок типа 452 и 198 для дизелей ЯМЗ-460 и ЗМЗ0514.

Марков В.А., Барченко Ф.Б., Слепцов О.Н., Трифонов В.Л., Остроухов А.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели расчетные исследования динамических качеств комбинированной силовой установки с поршневым двигателем, силовой турбиной и приводным компрессором. Отмечено, что статические и динамические показатели САР частоты вращения комбинированных силовых установок с поршневыми двигателями являются основными показателями их работоспособности. Улучшение указанных показателей может быть достигнуто путем выбора оптимальной схемы соединения элементов этих установок — поршневой части,

турбины, компрессора. Проанализированы конструктивные схемы комбинированных силовых установок с поршневыми двигателями. В качестве объекта исследования выбран дизельный двигатель типа Д6Н (6 ЧН 15/18), работающий в составе дизель-генераторной установки (ДГУ). Разработана математическая модель комбинированного двигателя с системой газотурбинного наддува и регулятором частоты вращения. Проведена сравнительная оценка динамических качеств двигателя с системой газотурбинного наддува и двигателя, оснащенного силовой турбиной и приводным компрессором. Показано, что замена системы газотурбинного наддува исследуемого двигателя силовой турбиной и приводным компрессором сокращает с 3,07 до 2,82 с продолжительность переходного процесса наброса полной нагрузки. При этом выполняются требования ГОСТ Р 55231–2012, устанавливающего предельное значение продолжительности переходного процесса на уровне 3 с для САР второго класса точности. Провал частоты вращения в переходном процессе увеличился от 2,3 до 2,6 %. Такое перерегулирование существенно меньше предельного значения перерегулирования (7,5 %), допускаемого ГОСТ Р 55231–2012.

Марков В.А., Слепцов О.Н., Шленов М.И., Болдырев А.В., Щепилов Е.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили результаты расчетного исследования влияния температуры окружающего воздуха на показатели автомобильного дизельного двигателя. С использованием ПК Дизель-РК, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана профессором Кулешовым А.С., выполнена оценка влияния температуры окружающего воздуха на показатели дизельного двигателя типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5), работающего на режиме максимальной мощности. Увеличение температуры окружающего воздуха от 0 до 50 °С вызывает снижение на 7 % эффективной мощности двигателя и увеличение на 2,4 % удельного эффективного расхода топлива. При этом отмечено повышение концентрации в ОГ оксидов азота на 19 % и снижение их дымности на 23,1 %. С использованием метода наименьших квадратов и ПК MathCAD получены аналитические зависимости указанных показателей от температуры окружающего воздуха. Максимальная погрешность определения этих параметров по предложенным формулам составила: 0,1095 % — для эффективной мощности двигателя, 0,2182 % — для удельного эффективного расхода топлива, 0,4740 % — для концентрации в ОГ оксидов азота, 1,2363 % — для дымности. Компенсация указанной зависимости мощностных показателей двигателя от температуры окружающего воздуха может быть обеспечена путем корректирования подачи топлива.

Марков В.А., Слепцов О.Н., Быковская Л.И., Болдырев А.В., Алёшин Г.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) выполнили расчетные исследования

параметров рабочего процесса автомобильного дизельного двигателя в условиях высокогорья. Рассмотрены особенности работы ДВС в высокогорных условиях. Показано негативное влияние уменьшения атмосферного давления в этих условиях на мощностные показатели двигателя и его топливную экономичность. С помощью ПК Дизель-РК выполнены расчетные исследования работы дизельного двигателя типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5) на режиме максимальной мощности в условиях высокогорья. Отмечено, что при увеличении высоты над уровнем моря от 0 до 4500 м эффективная мощность двигателя уменьшилась на 44,2 %, а удельный эффективный расход топлива увеличился на 13 %. Для предотвращения такого ухудшения показателей рабочего процесса двигателя проведена оптимизация степени повышения давления в компрессоре и угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ). При увеличении высоты над уровнем моря от 0 до 4500 м степень повышения давления в компрессоре увеличена от 1,72 до 3,32, а УОВТ уменьшен с 15...12 град п.к.в. до ВМТ. На высоте 4500 м над уровнем моря указанная коррекция позволила повысить эффективную мощность исследуемого двигателя от 80,2 до 80,4 кВт и снизить удельный эффективный расход топлива с 240,9 до 237,4 г/(кВт · ч) по сравнению с работой двигателя на равнинной местности.

Марков В.А., Девянин С.Н., Слепцов О.Н., Нормуродов А.А., Вальехо Мальдонадо П.Р. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, РУДН) исследовали влияние кислородсодержащих добавок к нефтяному дизельному топливу (ДТ) на показатели токсичности ОГ дизельного двигателя. Отмечено, что добавление в нефтяное ДТ кислородсодержащих веществ является эффективным методом снижения дымности ОГ. В качестве добавок в нефтяное ДТ исследованы рапсовое и подсолнечное масла (РМ и ПМ), а также метиловый эфир РМ (МЭРМ). При исследовании влияния указанных биодобавок на дымность ОГ использованы экспериментальные данные по двигателю типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5). Объемное содержание указанных компонентов в ДТ составляло 0...60 %. Установлена зависимость дымности ОГ от содержания атомов кислорода в молекулах исследуемых смесевых биотоплив. Показано, что увеличение доли кислорода от 0,4 до 7 % (что соответствует переходу от нефтяного ДТ к смеси 40 % ДТ и 60 % РМ) снижает дымность ОГ в 2–2,5 раза. Предложена аналитическая зависимость дымности ОГ двигателя от массового содержания атомов кислорода в молекулах рассматриваемых смесевых биотоплив на режимах ВСХ. Установлена взаимосвязь выбросов других токсичных компонентов ОГ (оксидов азота, монооксида углерода и несгоревших углеводородов) от дымности ОГ двигателя, работающего на рассматриваемых топливах на режимах ВСХ.

Кулешов А.А., Марков В.А., Поздняков Е.Ф., Шлёнов М.И. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели экспериментальное исследование дизельного двигателя, работающего на нефтяном ДТ с подачей водорода на впуске. Отмечена перспективность использования водорода в качестве безуглеродного МТ для ДВС. Проведен сравнительный анализ физико-химических и моторных свойств нефтяного ДТ и водорода. Рассмотрены различия этих свойств и проблемы использования водорода в качестве МТ. Проведены экспериментальные исследования дизельного двигателя типа Д-243 (1 Ч 11/12,5) в составе ДГУ, работающей на нефтяном ДТ с подачей водорода во впускную систему двигателя от электролизной установки Leader-4М, разработанной ООО «Техно-Хилл Клуб» (Москва). При подаче водорода на впуске в количестве 4 % общей подачи топлива на режиме с нагрузкой, равной 30...35 % полной нагрузки, удельный эффективный расход топлива уменьшился с 368,9 до 337,5 г/(кВт · ч), т. е. на 8,5 % по сравнению с чисто дизельным циклом. При этом на режиме с полной нагрузкой с долей подаваемого водорода, равной 1,8 % общей подачи топлива, отмечено снижение удельного эффективного расхода топлива с 270,5 до 269,5 г/(кВт · ч), т. е. на 0,37 % по сравнению с чисто дизельным циклом. При подаче водорода на впуске в количестве 1,8 % общей подачи топлива на режиме с полной нагрузкой дымность ОГ снизилась с 10,1 до 7,5 % по шкале Хартриджа, т. е. на 25,7 % по сравнению с чисто дизельным циклом. При этом отмечено увеличение концентрации в ОГ оксидов азота от 1413 до 1546 ppm, т. е. на 9,4 %.

Кулешов А.С., Кулешов А.А., Марков В.А., Фурман В.В., Плахов С.В. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) провели расчетные исследования параметров рабочего процесса двухтопливного дизельного двигателя с добавками аммиака во впускную систему. Проанализированы физико-химические свойства ряда нефтяных и альтернативных МТ, включая аммиак. Подтверждено, что воспламенение аммиака в цилиндрах дизельного двигателя целесообразно организовать от запальной дозы нефтяного ДТ. Проведены расчетные исследования дизельного двигателя типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5), работающего на нефтяном ДТ с подачей аммиака во впускную систему. Принято, что ДТ подавалось в КС штатной топливной системой, а аммиак в газовой фазе поступал во впускную систему двигателя после турбокомпрессора. Исследован режим максимальной мощности, равной 83,8 кВт, при частоте вращения коленчатого вала 2400 мин⁻¹. На этом режиме энергетическая доля аммиака в общей подаче топлива варьировалась в диапазоне 0...80 %. Расчеты показали, что с увеличением доли аммиака на 20 % эф-

фективный КПД двигателя увеличивается на 3,2 % по сравнению с КПД дизельного цикла. При дальнейшем росте доли аммиака на 80 % КПД двигателя уменьшается на ~ 10 %. В указанном диапазоне увеличения доли аммиака выброс углекислого газа снижается с 731,7 до 160,8 г/(кВт · ч). Окончательный вывод о рациональной доле аммиака в общей подаче топлива можно сделать не только с учетом достижения наилучших показателей топливной экономичности двигателя, но и с учетом минимизации вредных выбросов с ОГ.

Са Бовэнь, Лю Ин, Марков В.А., Фурман В.В., Плахов С.В. (Институт инженерной теплофизики Академии наук Китая, Aerospace Times Feihong Technology Co., LTD, Пекин, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) провели расчетные исследования процесса сгорания и экологических показателей двухтопливного дизельного двигателя, работающего на аммиаке. Исследована организация рабочего процесса тепловозного дизельного двигателя типа Д-49 (16 ЧН 26/26) на аммиаке с воспламенением рабочей смеси от запальной дозы метилового эфира соевого масла. Энергетическая доля аммиака в общей подаче топлива изменялась от 0 до 80 %. С использованием ПК Converge CFD исследованы режимы с частотой вращения коленчатого вала 450 мин⁻¹ и неполными нагрузками — с крутящими моментами на валу двигателя 1000 и 4000 Н · м. Увеличение энергетической доли аммиака в общей подаче топлива от 0 до 80 % на исследованных режимах сопровождалось ростом в 2,4–3,5 раза удельного эффективного расхода топлива. Показано, что подача аммиака оказывает заметное влияние на показатели токсичности ОГ. При подаче аммиака, равной 80 % общей подачи топлива, отмечена тенденция к снижению выбросов оксидов азота и заметному уменьшению дымности ОГ. Такая подача аммиака во впускную систему двигателя привела к увеличению выбросов монооксида углерода, а эмиссия диоксида углерода кардинально снижалась. Отмечены выброс несгоревшего аммиака с ОГ и неполное сгорание топлива. Отключение восьми из 16 цилиндров двигателя способствует улучшению показателей его топливной экономичности и токсичности ОГ.

Заев И.А., Смирнов С.В., Гордеев В.А. (ООО «Вычислительные технологии инжиниринга», Москва, РУДН) исследовали процесс сгорания смеси аммиака и продуктов его разложения в ДВС с искровым зажиганием. При расчетных исследованиях определялись показатели таких ДВС при использовании в качестве топлива метана и смеси, состоящей из аммиака и продуктов его разложения (водорода и азота). Полученные результаты

сравнивались с показателями двигателя, работающего на метане. Расчетные исследования проводились с помощью авторского кода на основе разработанной и верифицированной многозонной модели индикаторного процесса в ДВС. В качестве объекта исследования рассматривался одноцилиндровый двигатель установки типа УИТ-2008 для определения октановых чисел топлива. С использованием инструментов кинетического моделирования рабочего процесса определялись характеристики сгорания указанных топлив. Установлено, что смеси с долей разложившегося аммиака, равной 34...37 %, имеют скорость ламинарного пламени, сопоставимую со скоростью ламинарного пламени при сгорании метана в широком диапазоне коэффициентов избытка воздуха и начальных температур и давлений. Поэтому можно использовать тот же угол опережения зажигания, что и при работе на метане. При рассмотренных соотношениях разложившегося аммиака снижение мощности двигателя не превышало 8 %, а сокращение выбросов оксидов азота составляло ~ 50 % вследствие более низкой температуры сгорания смесового топлива. Установлены предельные степени сжатия, обеспечивающие бездетонационное сгорание топлива. Для метана эта степень сжатия составляла 15,5 единиц, а для смесового топлива на основе аммиака — 12 единиц.

Кулешов А.С., Кулешов А.А., Карташов А.Б., Буданов Р.Е. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели расчетные исследования параметров поршневого двигателя, конвертированного на работу на пропан-бутановых смесях. Обоснована необходимость использования газомоторных топлив в ДВС. Проведен сравнительный анализ физико-химических свойств природного газа и попутных нефтяных газов — пропан-бутановых смесей. Показаны преимущества использования в качестве газомоторного топлива пропан-бутановых смесей. Рассмотрены проблемы, возникающие при переводе дизельных двигателей на указанные газомоторные топлива, и мероприятия, обеспечивающие требуемые показатели таких двигателей. Обоснован выбор способа организации рабочего процесса двигателя, конвертируемого на пропан-бутановые смеси, заключающегося в подаче этой смеси в газовой фазе вблизи впускных клапанов каждого цилиндра и воспламенении рабочей смеси от свечи зажигания. Для оценки параметров дизельного двигателя, конвертированного на работу на пропан-бутановой смеси, проведено расчетное исследование двигателя типа КамАЗ 445 (4 ЧН 10,7/12,4). Расчет рабочего процесса такого газопоршневого двигателя проводился с помощью ПК Дизель-РК для режима максимальной мощности при частоте вращения коленчатого вала 2300 мин^{-1} и для режима холостого хода при ча-

стоте вращения 700 мин⁻¹. Проведенные расчетные исследования подтвердили возможность эффективной работы этого двигателя на пропан-бутановой смеси.

Камалтдинов В.Г., Попов А.Е., Лысов И.О., Ефимов Ю.А., Гонтарев Е.П. (ЮУрГУ, ЧАТТ, г. Челябинск) представили научную установку «Впрыск» для исследования процессов смесеобразования и сгорания газозводушных смесей широкого состава. Установка оснащена камерой постоянного объема (КПО), равного 4,0 л, с внутренним диаметром 225 мм и смотровым окном из кварцевого стекла диаметром 145 мм. Это позволяет с помощью высокоскоростной видеокамеры Photron FASTCAM SA-X2 проводить высокоскоростную съемку (от 125 до 40 000 кадр./с) процессов искро- и плазмообразования, сгорания при центральном и боковом положениях одновременно нескольких различных свечей зажигания. В КПО установлены шесть кранов для продувки и подачи воздуха, различных горючих и инертных газов, а также трубчатый электронагреватель, пьезокварцевые датчики давления фирмы AVL (Австрия), оригинальная термопара типа К. Кроме того, имеются специальные отверстия с резьбой для установки различных пассивных и активных форкамер. Система зажигания имеет энергию разряда до 2000 мДж. Оборудование установки позволяет исследовать процессы искрообразования, смесеобразования и сгорания при различных составах газозводушных смесей с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 0,8\text{--}2,0$ при давлениях и температурах сгорания до 100 бар и до 2000 К. Процессы искрообразования, видеосъемки, регистрации давления синхронизируются с помощью САУ, в которой все параметры управляющих импульсов задаются с точностью до 1 мкс и контролируются с помощью четырехканального осциллографа TDS2014C. Для контроля состава продуктов сгорания на выходе из КПО применялся газоанализатор с регистрацией содержания в ОГ монооксида и диоксида углерода, углеводов и оксидов азота.

Камалтдинов В.Г., Лысов И.О., Попов А.Е., Генделека Б.В., Ефимов Ю.А., Фурзиков В.В. (ЮУрГУ, г. Челябинск, ООО «Уральский дизель-моторный завод», г. Екатеринбург) представили результаты экспериментальных исследований процесса сгорания бедных метанозводушных смесей на описанной ранее установке «Впрыск» с КПО. Исследованы процессы принудительного зажигания и сгорания метанозводушной смеси при коэффициентах избытка воздуха 0,86–1,73 и температуре смеси порядка 293 К с использованием скоростной видеосъемки при скорости 1000 кадр/с. Установлено, что при зажигании смеси от искры на всех исследованных режимах сначала образовывался фронт голубого пламени, который распространялся по всей КС. Затем внутри этого фронта голубое свечение горючей

смеси постепенно становилось более ярким и переходило в белое. Наименьшее время задержки фиксирования голубого фронта составляло ~ 25 мс и наблюдалось при коэффициенте избытка воздуха 1,05. Для бедной смеси с коэффициентом избытка воздуха 1,27 задержка фиксирования голубого фронта превышала 60 мс. При более бедной смеси голубой фронт пламени зафиксировать не удавалось. Зарегистрированные диаграммы давления в КПО позволили получить характеристики тепловыделения и сгорания для каждого режима. С увеличением коэффициента избытка воздуха происходило замедление процесса сгорания и длительность момента достижения максимального давления в исследованном диапазоне составов смеси увеличивалась до 10 раз. В зависимости от количества метана и начального давления в КПО максимальное давление сгорания составляло 3,7...4,5 МПа. При этом максимальная расчетная скорость тепловыделения достигала 800 Дж/мс. Установлено, что наибольшая яркость белого свечения смеси совпадала по времени с максимальной скоростью тепловыделения. Исключение составил режим очень бедной смеси при коэффициенте избытка воздуха 1,73, когда свечения не было видно.

Камалтдинов В.Г., Марков В.А., Лысов И.О., Генделека Б.В. (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили результаты экспериментальных исследований скорости развития топливных струй в КПО установки «Впрыск» при разных показателях давления в аккумуляторе системы топливоподачи дизельного двигателя типа ЧН15/16. Исследования проведены с использованием скоростной видеосъемки при скорости 1000 кадр/с. Впрыск топлива проводился аккумуляторной топливной системой при давлении воздуха в КПО 30 бар и температуре смеси ~ 293 К, что соответствовало плотности рабочего тела в КПО форсированного двигателя в момент начала впрыска. Продолжительность электрического импульса управления электромагнитной форсункой принималась 1,5 мс, что соответствовало максимальной цикловой подаче. Давление в аккумуляторе устанавливалось в диапазоне 100...165 МПа, характерном для отечественных форсированных транспортных дизельных двигателей. При обработке результатов видеорегистрации определены текущие значения длин струй и получены мгновенные скорости движения их фронтов для каждой из восьми струй и их средние мгновенные скорости при каждом давлении в аккумуляторе. Установлено, что характер изменения скоростей движения фронтов струй при различных давлениях впрыскивания сохранялся, но более высокое давление топлива в аккумуляторе приводило к повышению мгновенных скоростей. Впрыск начинался с резкого увеличения средних скоростей движения фронтов струй

до 40...65 м/с. Через 0,3 мс эти скорости достигали максимума 55...75 м/с и затем снижались до 13...30 м/с в течение 1,6 мс. После 2,5...2,7 мс движение фронтов топливных струй практически прекращалось.

Камалтдинов В.Г., Марков В.А., Лысов И.О., Генделека Б.В. (ЮУрГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили результаты экспериментальных исследований скорости развития топливных струй в дизеле типа ЧН15/16 при различных противодавлениях в КПО. Исследования процессов впрыска и смесеобразования ДТ проводились со скоростной видеосъемкой на установке «Впрыск» при скорости 1000 кадр/с. Топливо впрыскивалось аккумуляторной системой при давлении 165 МПа. Давление воздуха в КПО устанавливалось 0,1...3,0 МПа при температуре ~ 293 К. Продолжительность электрического импульса управления электромагнитной форсункой принималась 1,5 мс. При обработке результатов видеорегистрации определены мгновенные скорости движения фронтов для каждой топливной струи и их средние мгновенные скорости при каждом давлении в КПО. Установлено, что при давлениях в КПО 0,1...1,0 МПа в начале впрыска средние скорости движения фронтов струй резко увеличивались до 100...135 м/с, через 0,3...0,5 мс достигали максимума 110...170 м/с и затем резко снижались. Продолжительность развития струй составляла 0,7...1,1 мс. При давлениях в КПО 1,5...3,0 МПа характер изменения скоростей струй практически сохранялся. В начале впрыска скорости движения фронтов струй резко возрастали до 65...90 м/с, через 0,3...0,5 мс достигали максимума 67...100 м/с, затем в течение 1,2...1,4 мс уменьшались до 3...19 м/с. Продолжительность развития топливных струй составляла 1,7...2,1 мс.

Елифанов В.С., Зябров В.А., Попов Д.А., Крутиев С.М. (РУТ) рассмотрели особенности эксплуатации судовых энергетических установок (СЭУ) безэкипажных судов. Представлена концепция реализации цифровых двойников СЭУ для обеспечения контроля, безопасности и прогнозирования технического состояния силовых агрегатов судна в режиме реального времени. Цифровые двойники предоставляют новые возможности для прогнозирования и оптимизации работы силовых агрегатов судна в будущем, что расширяет сферу использования САУ и САР в морском и речном судостроении. Автоматизированная система может анализировать данные о работе СЭУ, учитывать параметры окружающей среды и формировать оптимальные решения для повышения эффективности и снижения энергопотребления СЭУ. Это поможет сократить эксплуатационные расходы и улучшить экологическую эффективность СЭУ. Возможно использование технологии IoT (Интернета вещей), чтобы создать более простые,

но надежные модели цифровых двойников установки. С помощью технологий IoT создаются разноплановые приложения (цифровые двойники) для бизнеса, промышленности и современного транспорта. С более широким и активным внедрением технологии IoT можно добиться высокого экономического эффекта, а также обеспечить быстрое масштабирование и перенос результатов, полученных на одном объекте, на установки и агрегаты всей отрасли. Таким образом, эксплуатация СЭУ безэкипажных судов с использованием цифровых двойников является перспективным направлением развития судовой индустрии.

Раков В.А. (ВоГУ, г. Вологда) представил экономайзер теплоты ОГ для повышения топливной экономичности автомобильных ДВС. Это устройство, позволяющее утилизировать часть тепловой энергии ОГ, отдавая ее жидкому теплоносителю, имеет высокий КПД, малые габаритные размеры и низкое сопротивление потоку ОГ. Экономайзер сконструирован по принципу «труба в трубе», что уменьшает его габаритные размеры. Использование экономайзера позволяет управлять процессом теплообмена, полностью включать и отключать теплообменный контур. В выключенном состоянии направление газового потока не меняется, проходное сечение в трубе не уменьшается, что важно для систем с высокой скоростью потока газов. Экономайзер может использоваться для быстрого прогрева ДВС после запуска или работать в постоянном режиме, например, для отопления салона. Отмечено, что на режиме минимального холостого хода тепловая мощность экономайзера составила 1,0 кВт, коэффициент использования тепловой энергии ОГ достигает 85 %. При повышенных оборотах коленчатого вала двигателя тепловая мощность экономайзера составляет 3,0...7,4 кВт. Разработана математическая модель экономайзера, состоящая из моделей системы охлаждения ДВС, экономайзера и отопителя автомобиля. Исследования с помощью этой модели позволили определить эффективность применения теплообменника и смоделировать процесс работы всей системы охлаждения. Показано, что применение рекуператора теплоты ОГ позволяет сократить время прогрева ДВС до рабочей температуры с 22 до 10 мин (при температуре воздуха -27°C), а при включенном отопителе дополнительно получать 2,5 кВт тепловой энергии уже на 12 минуте прогрева.

Матюхин Л.М. (МАДИ) проанализировал влияние химического состава топлива на наполнение поршневого ДВС с внешним смесеобразованием. Рассмотрены параметры, характеризующие процесс наполнения цилиндров двигателя: коэффициенты наполнения, очистки и дозарядки, избытка воздуха, степень рециркуляции ОГ, коэффициент остаточных

газов и др. Проанализирована взаимосвязь этих коэффициентов и их влияние на процесс наполнения. Проведена оценка наполнения цилиндров ДВС при использовании топлив различных составов и наличии рециркуляции ОГ. Рассмотрены следующие виды топлива: бензин, метанол, этанол, бутанол, водород, диметиловый эфир. Проанализированы особенности процесса наполнения при использовании в качестве топлива индивидуальных углеводородов парафинового ряда — метана, этана, пропана, бутана, пентана. Отмечено, что на процесс наполнения цилиндров поршневого ДВС рабочей смесью оказывают влияние молекулярная масса топлива и коэффициент избытка воздуха. Проведен анализ влияния объемной доли воздуха в рабочей смеси на индикаторные показатели двигателя. Сделан вывод о том, что благодаря наглядности рассмотрение процессов газообмена на базе парциальных объемов компонентов рабочей смеси существенно расширяет возможности проведения анализа и получения уточненных аналитических зависимостей для расчета основных показателей рабочего цикла ДВС.

Вальехо Мальдонадо П.Р., Чайнов Н.Д. (РУДН, МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрели особенности уравнивания автомобильного двигателя типа VR. Проанализировано уравнивание пятицилиндрового четырехтактного двигателя типа VR с углом развала цилиндров 15° дезаксиальным кривошипно-шатунным механизмом и равномерным чередованием вспышек. Приведены формулы, позволяющие рассчитать и проанализировать возникающие в двигателе VR-5 моменты от сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс для любого заданного значения угла развала цилиндров, отношения радиуса кривошипа к длине шатуна и относительного смещения оси цилиндра. Предложен способ уравнивания неуравновешенных моментов от сил инерции вращающихся и возвратно-поступательно движущихся масс двигателя. Выявлено, что для уравнивания моментов всех сил инерции возвратно-поступательных движущихся масс в исследуемых двигателях достаточно двух пар валов с противовесами, которые совместно вращаются с частотами вращения, равными частоте вращения коленчатого вала и удвоенной частоте вращения. При использовании коленчатого вала в качестве одного из уравнивающих валов необходимо использовать три дополнительных вала с противовесами. Один из них вращается с частотой вращения коленчатого вала, но в направлении, противоположном его вращению. Два других вращаются с удвоенной частотой вращения, но направления их вращения противоположны.

Росляков А.Д., Курманова Л.С., Петухов С.А., Карпенко М.Ю. (СамГУПС, г. Самара) рассмотрели особенности проектирования системы

для подачи аммиака во впускную систему дизельного двигателя тепловозного назначения. В качестве объекта исследования выбран дизельный двигатель типа Д50 (6 ЧН 31,8/33), работающий в составе ДГУ 1-ПДГ4Д маневрового тепловоза ТЭМ 18ДМ. При этом запальное ДТ подавалось в цилиндры двигателя штатной системой топливоподачи двигателя, аммиак в жидкой фазе без предварительного испарения подавался во впускной коллектор. Разработана расчетная методика для оценки необходимых параметров подачи аммиака на впуске. При этом рассмотрен вариант подачи аммиака во впускную систему двигателя за турбокомпрессором, работающим на режиме, соответствующем восьмой позиции контроллера машиниста. Показано, что исходя из условия обеспечения минимальных выбросов оксидов азота на этом режиме целесообразно заместить 40...60 % ДТ аммиаком. Устройство для распыливания аммиака имеет два распыливающих отверстия диаметром ~ 1 мм. Проведенные расчетные исследования позволили оптимизировать размеры и параметры устройства для подачи аммиака во впускной коллектор, включая давление и расход аммиака, площадь проходных сечений отверстий указанного устройства, место его установки.

Заключение. Приведенные основные результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы.

Современные стационарные и мобильные теплоэнергетические установки оснащаются преимущественно поршневыми ДВС. Основными показателями таких установок остаются их мощностные и динамические показатели, топливная экономичность и выбросы вредных веществ с ОГ. Обеспечение требуемых значений указанных показателей возможно лишь при оснащении теплоэнергетических установок современными САУ и САР.

Указанные САУ и САР обеспечивают наиболее эффективное протекание процессов в различных системах комбинированных энергетических установок и удовлетворяют современные жесткие требования, предъявляемые к мощностным и динамическим показателям этих установок, топливной экономичности и токсичности их ОГ. Среди последних показателей следует выделить выбросы нормируемых токсичных компонентов ОГ — оксидов азота, монооксида углерода, несгоревших углеводородов и твердых частиц, а также выбросы в атмосферу углекислого газа.

Для сокращения выбросов расширяется применение в теплоэнергетических установках с ДВС различных альтернативных топлив. В целях снижения парникового эффекта целесообразно использование в этих установках безуглеродных и низкоуглеродных МТ. К первым относят водород и аммиак, ко вторым — газомоторные топлива — природный

и попутный нефтяной газы, а также различные биотоплива. При этом аммиак как МТ имеет ряд преимуществ по сравнению с водородом, среди которых возможность его относительно безопасного хранения и использования, бездетонационное сгорание в цилиндрах двигателя.

Цена перечисленных низкоуглеродных газомоторных топлив примерно в 2 раза ниже по сравнению с ценой нефтяных МТ. Их использование позволяет уменьшить выбросы сажи с ОГ двигателя, углекислого газа, обеспечить пониженный расход моторного масла и износ деталей двигателя. Выброс углекислого газа снижается на 15...20 %.

Среди биотоплив необходимо выделить топлива, получаемые из растительных масел, и различные спиртовые топлива. Первые используются в дизельных двигателях, а вторые преимущественно в бензиновых двигателях. Использование биотоплив позволяет снизить техногенное воздействие транспортного сектора на окружающую среду и расширить сырьевую базу для получения МТ.

Другими важными направлениями совершенствования САУ и САР теплоэнергетических установок с ДВС являются совершенствование процесса топливоподачи дизельных двигателей и поддержание заданного соотношения подач в цилиндры бензинового двигателя топлива и воздуха. Решение этих задач обеспечивает требуемые значения мощностных и динамических показателей этих установок, показателей их топливной экономичности и токсичности ОГ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. New York, McGraw-Hill, 2018.
- [2] Gupta H.N. Fundamentals of internal combustion engines. Delhi, PHI Learning, 2013.
- [3] Bosch. Системы управления дизельными двигателями. М., За рулем, 2004.
- [4] Bosch. Системы управления бензиновыми двигателями. М., За рулем, 2005.
- [5] Марков В.А. Проблемы и перспективы совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 1 (148), с. 128–155. EDN: НКCYSS
- [6] Марков В.А. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 4 (139), с. 94–123. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-94-123>
- [7] Хрящев Ю.Е., Тихомиров М.В., Епанешников Д.А. Алгоритмы управления двигателями внутреннего сгорания. Ярославль, Изд-во ЯГТУ, 2016.
- [8] Душкин П.В., Савастенко А.А., Ховренков С.С. и др. Автоматизация настройки ПИ-регулятора системы управления давлением топлива в аккумуляторной топливной системе дизеля. *Двигателестроение*, 2023, № 1, с. 51–63. EDN: YTUNHPQ

- [9] Александров А.А., Марков В.А., ред. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания. М., Инженер, Оникс-М, 2012.
- [10] Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск, Изд-во ВЛУ им. В. Даля, 2009.
- [11] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М., Изд-во МАДИ, 2000.
- [12] Гайворонский А.И., Гордин М.В., Марков В.А. Проблемы и перспективы использования безуглеродных и низкоуглеродных моторных топлив в условиях различных сценариев перехода к углеродно-нейтральной энергетике. *Двигателестроение*, 2022, № 2, с. 4–28. EDN: WGWIAU
- [13] Пискунов И.В., Глаголева О.Ф., Голубева И.А. Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора. Часть 1. Газомоторное топливо. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2021, № 4, с. 68–77. EDN: XUXHTK
- [14] Пискунов И.В., Глаголева О.Ф., Голубева И.А. Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора. Часть 2. Водородное топливо. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2021, № 5, с. 53–62. EDN: GLJEFC
- [15] Пискунов И.В., Ершов М.А., Глаголева О.Ф. Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора. Часть 3. Биотопливо. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2021, № 6, с. 39–46. EDN: LEMVYU
- [16] Марков В.А., Девянин С.Н., Са Бовэнь и др. Исследование работы дизельного двигателя на смесевых и эмульгированных биотопливах с добавками рапсового масла. *Двигателестроение*, 2023, № 1, с. 70–90. EDN: OOONAY
- [17] Гайворонский А.И., Гордин М.В., Марков В.А. и др. Технологии промышленного получения водорода и его использования в транспортных энергетических установках. *Двигателестроение*, 2022, № 1, с. 3–20. EDN: CJGSDE
- [18] Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
- [19] Митрова Т., Мельников Ю., Чутунов Д. и др. Водородная экономика — путь к низкоуглеродному развитию. М., Центр энергетики Московской школы управления Сколково, 2021.
- [20] Козлов С.И., Фатеев В.Н. Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы. М., Газпром ВНИИГАЗ, 2009.
- [21] Фомин В.М. Водородная энергетика автомобильного транспорта. М., Изд-во РУДН, 2006.
- [22] Климентьев А.Ю., Климентьев А.А. Аммиак — перспективное моторное топливо для безуглеродной экономики. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2017, № 3, с. 32–44. EDN: YUNIOF
- [23] Климентьев А.Ю., Климентьев А.А. Аммиак — перспективное моторное топливо для безуглеродной экономики. Окончание. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2017, № 4, с. 17–27. EDN: ZBMVCX

- [24] Абызов О.В., Галышев Ю.В., Иванов А.К. и др. Моделирование индикаторного процесса автомобильного газового двигателя при его работе на аммиаке. *Двигателестроение*, 2023, № 1, с. 64–69. EDN: MJDWEW
- [25] Кулешов А.С., Кулешов А.А., Марков В.А. и др. Расчетные исследования параметров рабочего процесса дизельного двигателя с добавками аммиака во впускную систему. *Двигателестроение*, 2023, № 3, с. 71–93. EDN: BZYUWM
- [26] Са Бовэнь, Лю Ин, Марков В.А., и др. Характеристики процесса сгорания и экологические показатели двухтопливного дизельного двигателя, работающего на аммиаке. *Двигателестроение*, 2023, № 4, с. 73–87. EDN: SDLUSI
- [27] Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Сапронов Д.П. Применение методов машинного обучения при разработке динамической модели дизельного двигателя. *Двигателестроение*, 2023, № 1, с. 38–50. EDN: RQELCB
- [28] Марков В.А., Поздняков Е.Ф., Фурман В.В. и др. Моделирование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 7, с. 35–46.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-7-35-46>
- [29] Зенкин В.А. Многокритериальная оптимизация газообмена одноцилиндрового дизеля с помощью промежуточной нейросетевой модели. *Двигателестроение*, 2022, № 3, с. 32–47. EDN: PXULBD
- [30] Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Каменских С.А. Разработка нейросетевого регулятора для дизеля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 5, с. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-5-90-100>

Марков Владимир Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» 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. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок и направления их совершенствования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 1 (152), с. 142–168.
EDN: UWELZA

AUTOMATIC CONTROL AND REGULATION SYSTEMS OF THE THERMAL POWER PLANTS AND APPROACHES TO THEIR IMPROVEMENT

V.A. Markov

markov58@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers main approaches to further improvement of the automatic control and regulation systems at the thermal power plants. It shows that in modern stationary and mobile thermal power plants mainly the piston internal combustion engines are used. The paper notes that equipping the plants with the automatic control and regulation systems ensures the most efficient flow of processes in various systems of the combined power plants and satisfies the modern stringent requirements for their power and dynamic indicators, as well as for the fuel efficiency and the exhaust gases toxicity. At the present stage of development of the thermal power plants with the internal combustion engines, the most important task is the need to improve the exhaust gases toxicity. The paper analyzes methods and means for improving the said indicators. In order to reduce emissions of harmful substances into the atmosphere, the use of various alternative fuels in the thermal power plants is expanding. To reduce the greenhouse effect, it is advisable to use the carbon-free and low-carbon motor fuels, such as hydrogen, ammonia, natural gas and biofuels based on the ethyl alcohol and vegetable oils in the thermal power plants

Keywords

Thermal power plant, internal combustion engine, diesel engine, gasoline engine, automatic control system, automatic regulation system, alternative fuel

Received 24.05.2024

Accepted 15.01.2025

© Author(s), 2025

The paper was based on materials of the reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference n.a. Professor V.I. Krutov (31.01.2024)

REFERENCES

- [1] Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. New York, McGraw-Hill, 2018.
- [2] Gupta H.N. Fundamentals of internal combustion engines. Delhi, PHI Learning, 2013.
- [3] Bosch R. Diesel-engine management. Bentley, 2004.
- [4] Bosch R. Gasoline engine management handbook. Brooklands Books, 2005.

- [5] Markov V.A. Problems and prospects of improving the automatic control and regulation systems of the thermal power plants. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 1 (148), pp. 128–155 (in Russ.).
EDN: HKCYSS
- [6] Markov V.A. Automatic control and regulation systems for heat and power plants. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 4 (139), pp. 94–123 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-94-123>
- [7] Khryashchev Yu.E., Tikhomirov M.V., Epaneshnikov D.A. Algoritmy upravleniya dvigatelyami vnutrennego sgoraniya [Control algorithms for internal combustion engines]. Yaroslavl, YaGTU Publ., 2016.
- [8] Dushkin P.V., Savastenko A.A., Khovrenok S.S., et al. Automation of the setting of the pi-controller of the fuel pressure control system in the diesel battery fuel system. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2023, no. 1, pp. 51–63 (in Russ.).
EDN: YTUHPQ
- [9] Aleksandrov A.A., Markov V.A., eds. Alternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Alternative fuels for internal combustion engines]. Moscow, Inzhener Publ., Oniko-M Publ., 2012.
- [10] Vasilyev I.P. Vliyanie topliv rastitelnogo proiskhozhdeniya na ekologicheskie i ekonomicheskie pokazateli dizelya [The influence of vegetable fuels on the environmental and economic performance of diesel]. Lugansk, VNU im. V. Dalya Publ., 2009.
- [11] Lotko V., Lukanin V.N., Khachiyan A.S. Primenenie alternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya [Use of alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, MADI Publ., 2000.
- [12] Gayvoronskiy A.I., Gordin M.V., Markov V.A. Problems and prospects of using carbon-free and low-carbon motor fuels in various scenarios of transition to carbon-neutral energy. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2022, no. 2, pp. 4–28 (in Russ.).
EDN: WGWIAU
- [13] Piskunov I.V., Glagoleva O.F., Golubeva I.A. Alternative fuels for sustainable development of the transport sector. Part 1. Gas engine fuel. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2021, no. 4, pp. 68–77 (in Russ.). EDN: XUXXTK
- [14] Piskunov I.V., Glagoleva O.F., Golubeva I.A. Alternative fuels for sustainable development of the transport sector. Part 2. Hydrogen fuel. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2021, no. 5, pp. 53–62 (in Russ.). EDN: GLJEFC
- [15] Piskunov I.V., Ershov M.A., Glagoleva O.F. Alternative fuels for sustainable development of the transport sector. Part 3. Biofuels. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2021, no. 6, pp. 39–46 (in Russ.). EDN: LEMVYU
- [16] Markov V.A., Devyanin S.N., Sa Boven, et al. Investigation of diesel engine operation on mixed biofuels and emulsified biofuels with rapeseed oil additives. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2023, no. 1, pp. 70–90 (in Russ.). EDN: OONAY
- [17] Gayvoronskiy A.I., Gordin M.V., Markov V.A., et al. Technologies of industrial production of hydrogen and its use in transport power plants. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2022, no. 1, pp. 3–20 (in Russ.). EDN: CJGSDE

- [18] Kavtaradze R.Z. *Teplofizicheskie protsessy v dizelyakh, konvertirovannykh na prirodnyy gaz i vodorod* [Thermophysical processes in diesel engines converted to natural gas and hydrogen]. Moscow, BMSTU Publ., 2011.
- [19] Mitrova T., Melnikov Yu., Chugunov D., et al. *Vodorodnaya ekonomika — put k nizkouglerodnomu razvitiyu* [Hydrogen economy — the way to low-carbon development]. Moscow, Tsentr energetiki Moskovskoy shkoly upravleniya Skolkovo Publ., 2021.
- [20] Kozlov S.I., Fateev V.N. *Vodorodnaya energetika: sovremennoe sostoyanie, problemy, perspektivy* [Hydrogen energy: current state, problems, prospects]. Moscow, Gazprom VNIIGAZ Publ., 2009.
- [21] Fomin V.M. *Vodorodnaya energetika avtomobilnogo transporta* [Hydrogen energy of automobile transport]. Moscow, RUDN Publ., 2006.
- [22] Klimentyev A.Yu., Klimentyev A.A. Ammonia as a promising motor fuel for a carbon-free economy. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2017, no. 3, pp. 32–44 (in Russ.). EDN: YUNIOF
- [23] Klimentyev A.Yu., Klimentyev A.A. Ammonia as a promising motor fuel for a carbon-free economy. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2017, no. 4, pp. 17–27 (in Russ.). EDN: ZBMVCX
- [24] Abyzov O.V., Galyshev Yu.V., Ivanov A.K., et al. Modeling of the indicator process of the automobile gas engine during its operation with ammonia. *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2023, no. 1, pp. 64–69 (in Russ.). EDN: MJDWEW
- [25] Kuleshov A.S., Kuleshov A.A., Markov V.A., et al. Computational studies of parameters of working process of diesel engine with ammonia additives in the intake system. *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2023, no. 3, pp. 71–93 (in Russ.). EDN: BZYUWM
- [26] Sa Boven, Lyu In, Markov V.A., et al. Combustion process characteristics and ecological indicators of the two-fuel diesel engine running on ammonia. *Dvigatelistroenie*, 2023, no. 4, pp. 73–87 (in Russ.). EDN: SDLUSI
- [27] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Saprionov D.P. Application of machine learning methods in developing a dynamic diesel engine model. *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2023, no. 1, pp. 38–50 (in Russ.). EDN: RQELCB
- [28] Markov V.A., Pozdnyakov E.F., Furman V.V., et al. Simulation of the diesel engine rotational speed automatic control system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2019, no. 7, pp. 35–46 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-7-35-46>
- [29] Zenkin V.A. Multi-objective optimization of single-cylinder diesel engine gas exchange via the surrogate neural network model. *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2022, no. 3, pp. 32–47 (in Russ.). EDN: PXULBD
- [30] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Kamenskikh S.A. On the issue of developing the diesel engine neural network controller. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 5, pp. 90–100 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-5-90-100>

Markov V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Markov V.A. Automatic control and regulation systems of the thermal power plants and approaches to their improvement. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 1 (152), pp. 142–168 (in Russ.).

EDN: UWELZA