

КОМПЛЕКСНОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДИЗЕЛЕЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В.Н. Ложкин, д.т.н., проф.; Р.Н. Сафиуллин к.т.н., доц.; М.А. Шнайдер, студент СПГАСУ

К первоочередным мерам по улучшению показателей парка автомобильных дизелей следует отнести повышение топливной экономичности и улучшение экологических качеств. Это достигается использованием эффективных комплексных средств и методов целенаправленного физико-химического воздействия на параметры процессов дизельного цикла.

Сформулированы основные условия организации рабочего цикла дизеля с улучшенными эколого-экономическими показателями. Показано, что универсальным воздействием на процесс горения топлива обладает ВТЭ переменного состава.

Проведены экспериментальные исследования на удизеле, подтверждающие возможность одновременного снижения NO_x и дымности ОГ.

Автомобильные двигатели представляют важнейшую основу энергетического обеспечения страны. Расширение парка дизельных двигателей повышает остроту проблемы их качественного совершенствования. Признавая важность совершенствования дизелей по многим направлениям, к первоочередным следует отнести повышение топливной экономичности и улучшение экологических качеств. Это диктуется необходимостью безотлагательного решения таких крупных социально-экономических проблем, как энергосбережение и охрана окружающей среды.

Комплексное решение этих проблем связано со значительными трудностями вследствие их взаимных противоречий. Серьезные противоречия выявляются и при решении локальных задач по каждой из проблем, что приводит к усложнению базовой конструкции двигателя и его систем. Решение отмеченных проблем связано с поиском новых нетрадиционных путей дальнейшего совершенствования рабочих процессов в дизеле.

Одним из таких путей является использование эффективных комплексных средств и методов целенаправленного физико-химического воздействия на параметры процессов дизельного цикла,

оказывающих определяющее влияние на снижение расхода топлива и вредных выбросов двигателя. Применение подобных средств рационального управления процессами рабочего цикла позволяет без существенной переналадки отлаженного серийного производства, с малыми затратами на конструкторские, технологические и организационные мероприятия решить задачи повышения топливной экономичности, снижения токсичности и дымности отработавших газов (ОГ) дизелей при сохранении их моторесурса.

Обобщение результатов выполненных исследований по рассматриваемой проблеме позволило сделать следующие выводы.

Известно большое количество исследований, в которых экспериментально выявлена качественная связь между параметрами объемно-кинетической стадии сгорания в дизеле и показателями его экологических качеств [1, 2]. Предложены методы воздействия на кинетические параметры этой стадии сгорания. Однако отсутствие четкого аналитического обоснования указанной взаимосвязи не позволяет сформулировать концепцию комплексного подхода к решению проблемы улучшения эколого-экономических показателей дизеля. Применение известных методов воздействия на внутрицилиндровые процессы для снижения содержания в ОГ главного токсического компонента — оксидов азота, как правило, сопряжено с повышением выброса твердых частиц и ухудшением топливной экономичности двигателя.

Многочисленными экспериментальными исследованиями выявлена «универсальная» взаимосвязь между топливной экономичностью дизеля и токсичностью его ОГ по определяющему компоненту — NO_x , которая выражается в том, что любое воздействие, направленное на сокращение выхода NO_x , приводит к снижению термодинамической эффективности дизельного цикла. Решение столь противоречивой и взаимосвязанной задачи — снижение расхода топлива и выбросов NO_x — представляет собой сложную научную и практическую проблему, которая не может быть разрешима традиционными методами.

Для разработки малотоксичного и экономичного цикла может служить принцип рационального управления кинетическими параметрами рабочих процессов цикла. Расчетно-аналитическое исследование взаимосвязи между этими параметрами и эколого-экономическими показателями цикла проводилось с использованием метода математического моделирования, базирующегося на основе описания реальных процессов рабочего цикла дизеля физически обоснованными аппроксимирующими зависимостями с привлечением известных положений теории смесеобразования и сгорания.

Проведено расчетно-аналитическое исследование, которое позволило сформулировать основные условия организации рабочего цикла дизеля с улучшенными эколого-экономическими показателями, которые представлены на рис.1. Выполнение этих условий достигается на основе многофункционального комплекса средств воздействия на механизмы индивидуальных процессов путем реализации следующих мер.

1. Обеспечение рациональных, по соображениям скорости, нарастаний давления в цилиндре и эффективности цикла, момента начала подачи топлива и периода задержки воспламенения.

2. Обеспечение рационального перераспределения скоростей сгорания (тепловыделения) по

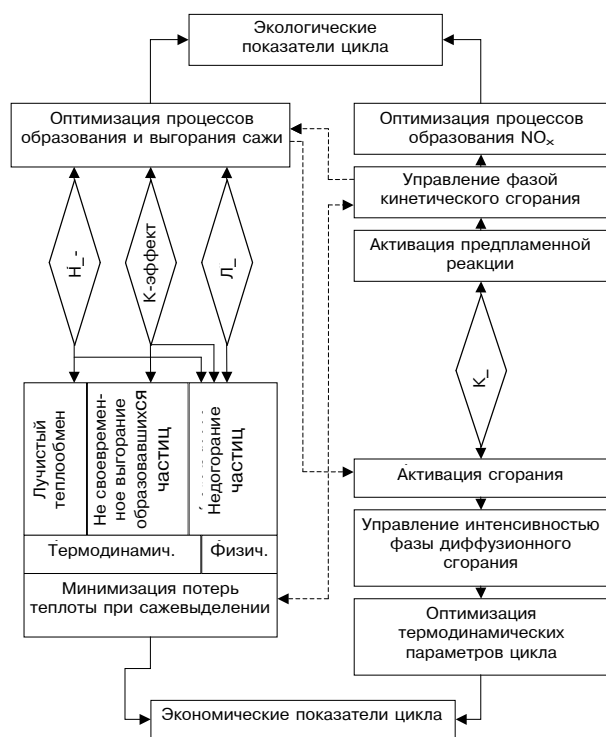


Рис. 1. Условия организации рабочего цикла дизеля с улучшенными экологическими и экономическими показателями

характерным стадиям рабочего цикла: снижение максимальной скорости тепловыделения и относительного выделения теплоты в кинетической стадии сгорания за счет интенсификации актов предпламенных реакций углеводородо-воздушной среды; повышение интенсивности ее выгорания в основной (диффузионной) стадии, приводящее к сокращению процесса сгорания в целом за цикл.

3. Снижение температурной неоднородности среды реагирования путем расширения пределов воспламенения топливо-воздушной смеси вследствие каталитической активации последней (К-эффект).

4. Уменьшение интенсивности текущего сажевыделения за счет ингибирования актов зарождения первичных частиц свободного углерода (И-эффект).

5. Интенсификация выгорания сжатых частиц путем их диспергирования (Д-эффект) и каталитической активации (К-эффект) реакций окисления высвободившегося углерода.

Из рассмотренного следует, что для рациональной организации рабочего цикла дизеля необходим многофункциональный комплекс средств воздействия на механизмы индивидуальных процессов, обуславливающих экономические и экологические показатели цикла. Наряду с заданной индивидуальной направленностью каждое из этих средств должно обладать возможностью проявлять свое воздействие в строго определенной стадии рабочего цикла:

- каталитические активаторы реакций предпламенных превращений углеводородов топлива, проявляющие свою активность (К-эффект) в период, предшествующий воспламенению;
- каталитические средства, ускоряющие акты химического реагирования углеводородо-воздушной смеси в основной и завершающей стадиях, тепловыделения;
- средства подавления зародышей сажистых частиц (И-эффект) на стадии их образования;
- средства, обладающие эффектом диспергирования частиц сажи (Д-эффект) в период активного диффузионного сгорания;
- средства для формирования необходимой каталитической среды (К-эффект) в период массового выгорания (дожигания) сажи.

Средства, оказывающие активирующее воздействие на кинетику предпламенного реагирования углеводородно-воздушной среды в дизеле, являются одним из важнейших компонентов рассматриваемого комплекса. Большинство химических превращений в среде осуществляется по цепному механизму, ведущая роль в развитии которого принадлежит химически активным частицам (центрам зарождения

реакции). Принятая концепция цепного механизма развития реакций позволяет качественно оценить действия небольших доз активных продуктов, вводимых в реагирующую среду, если рассматривать эти продукты как дополнительный источник активных частиц, образующихся в процессе их диссоциации. С учетом этого предположения, используя известную зависимость акад. Семенова Н.К. для реакций, заканчивающихся появлением пламени, получена закономерность изменения времени индукции τ_1 в зависимости от содержания активных компонентов σ_a и эффективности V_a введенного активирующего средства в виде:

$$\frac{\partial \tau_1}{\partial \delta_a} = - \left[V_a K^2 (A + K \delta_a V_a) \right]^{-1}.$$

В результате воздействия активных частиц эффективная (кажущаяся) энергия активации основной массы среды, характеризующая ее реакционную способность, снижается, что связано с уменьшением участия в суммарном кинетическом процессе реакций самозарождения.

На основе современной теории образования углерода при сжигании углеводородного топлива сформулированы основные принципы разработки средств, обладающих способностью снижения (ингибирования) активности образования зародышей сажистых частиц при сгорании топлива в дизеле. Исследован механизм ингибирующего воздействия ряда подобных средств, в том числе и водородосодержащих. Определены критерии для сравнительной оценки ингибирующего эффекта антидымных средств, проведена оценка их воздействия с учетом эффекта водородного торможения по Лангмюру.

Наиболее полно эффект водородного торможения на механизм образования сажи при горении топлива в дизелях реализуется за счет подачи в цилиндр дизеля воды или водотопливной эмульсии. Вода, поданная в цилиндр дизеля, оказывает многофакторное воздействие на горение топлива, образование и выход сажи, NO_x и других вредных компонентов [3]. Механизм воздействия на выход NO_x разделяется на физический и кинетический. Физическое воздействие заключается в снижении температуры в зоне горения топлива за счет увеличения теплоты парообразования смеси воды и топлива. В результате этого воздействия возникает «торможение» предпламенных процессов и основное горение смещается за ВМТ. Кинетический механизм характеризуется накоплением большого количества топлива, подготовленного к сгоранию за счет задержки самовоспламенения, и быстрым выгоранием топлива за ВМТ. Высокую

скорость выгорания топлива на линии расширения поддерживает гидроксильная группа OH , образующаяся за счет диссоциации воды, впрыснутой с топливом. Однако вследствие расширения температура горения ниже, чем в обычном процессе, поэтому скорость образования NO_x снижается.

Опыт практических исследований показал, что использование ВТЭ в дизелях обладает следующими особенностями в сравнении со стандартным углеводородным топливом:

- энергетический баланс процессов диссоциации воды, а затем окисления продуктов диссоциации, близок к нулю и на улучшение экономичности заметно повлиять в принципе не может;

- при работе двигателя на ВТЭ за счет участия продуктов диссоциации воды в горении топлива улучшается полнота его сгорания, вследствие чего в 2–3 раза снижается дымность отработавших газов;

- за счет снижения температуры горения сокращается образование и выход окислов азота (NO_x) на 30–50 %, при содержании воды в топливе — на 15–40 %.

Все вышеперечисленные преимущества ВТЭ, в особенности улучшение экологических показателей дизеля, удается полностью реализовать только в том случае, если состав ВТЭ переменный; максимальное содержание воды на высоких нагрузках; полное отсутствие воды на нагрузках менее 20–30 % от номинальной. В противном случае, при работе дизеля с малой нагрузкой и на холостом ходу, вместо положительного эффекта наблюдается повышенное дымление, большое количество выбросов CO и CH , неустойчивая работа вследствие переохлаждения.

Необходимо отметить одно отрицательное свойство ВТЭ как моторного топлива, ограничивающее область ее применения — узкий температурный диапазон существования смеси топлива и воды в виде эмульсии. Сильное увеличение вязкости ВТЭ с понижением температуры приводит к тому, что при температурах близких к 0°C эмульсия практически не прокачивается через топливную систему двигателя, а при -5°C и вовсе замерзает. При нагревании выше 60°C ВТЭ, даже содержащая мощные эмульгаторы, быстро расслаивается на воду и исходное топливо. Другими словами, ВТЭ можно применять только при изменении температуры в интервале $+40$ – $+10^\circ\text{C}$, то есть в летнее время или в обитаемых помещениях.

Предложена и исследована оригинальная система питания транспортного дизеля водотопливной эмульсией, содержащая устройство для приготовления, дозирования и подачи воды [4]

в топливоподающий контур штатной системы питания дизеля. Для обеспечения стабильности ее характеристик в широком диапазоне изменения параметров топливоподачи использовалась новая конструкция нагнетательного клапана ТНВД [5].

Эмульсия приготавливалась, дозировалась и подавалась в дизель с помощью устройства с малоинерционным обратным клапаном, размещенным в магистрали штатной топливоподающей аппаратуры. Система (рис. 2) устанавливалась на автомобиль КамАЗ и испытывалась в условиях эксплуатации.

Эффективность использования ВТЭ тем выше, чем больше нагрузка и частота вращения дизеля, то есть количественное содержание воды в топливе переменное и зависит от нагрузки: чем больше нагрузка, тем больше воды в топливе. Это достигается конструктивным решением автоматического устройства приготовления и подачи ВТЭ дизеля автомобиля, где обеспечивается прямая связь между перемещением рейки ТНВД 7 и открытием клапана подачи водного компонента. За счет настройки элемента (изменяя сопротивление возвратной пружины) можно подобрать любой режим работы дизеля на ВТЭ. Этот режим должен

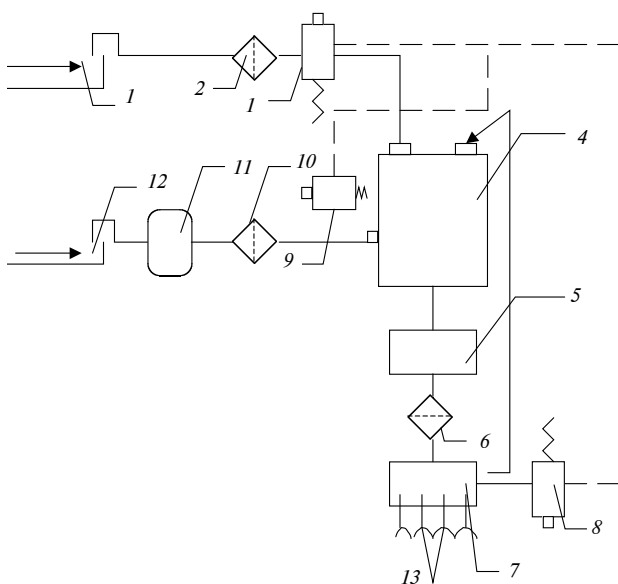


Рис. 2. Схема устройства приготовления и подачи ВТЭ дизеля автомобиля:

1 — расходный водяной бак; 2, 6, 10 — фильтры: водяной, ВТЭ, топливный; 3, 9 — электропневматические клапаны для дозировки водной фазы ВТЭ и эмульгатора (при необходимости); 4 — диспергирующее устройство; 5 — датчик определения процентного содержания воды в ВТЭ; 7 — топливный насос высокого давления; 8 — автоматическое регулирующее устройство; 11 — топливоподкачивающий насос; 12 — расходный топливный бак; 13 — форсунки

обеспечить преимущества ВТЭ как основного вида топлива. Воздействием на клапан подачи водного компонента сжатым воздухом переменного давления перемещается рейка ТНВД 7. Таким образом, получаем процесс автоматического регулирования содержания водного компонента ВТЭ, что и обеспечивает одновременное улучшение экономических и экологических показателей дизелей автомобильного типа КамАЗ-740.

Для достижения наибольшей экономичности и снижения тепловой напряженности дизель может работать на эмульсии с содержанием воды до 40%. С увеличением концентрации воды экономия топлива увеличивается, достигая максимума, а в дальнейшем снижается. Максимум экономии обеспечивается возможностью регулирования содержания воды в зависимости от мощности, что и предусматривает автоматический регулятор.

Отличительными особенностями предложенного нового принципа организации рабочего цикла дизеля являются: высокая эффективность — возможность снижения выбросов NO_x с ОГ при одновременном уменьшении их дымности и удельного расхода топлива; универсальность — возможность применения на любых типах дизелей, в т. ч. и на дизелях, находящихся в эксплуатации; конструктивная простота и низкая стоимость технических средств, реализующих данный принцип; расширение возможностей применения в дизелях традиционных, смешанных, альтернативных топлив с ухудшенными эксплуатационными характеристиками.

Стандовыми и эксплуатационными испытаниями установлено, что при перечисленных выше отличительных особенностях предложенного принципа организации рабочего цикла обеспечивается получение следующих положительных качеств при работе дизелей: снижение выбросов с ОГ NO_x на 20–35 %; уменьшение содержания сажи в ОГ на 35–65 % и более; уменьшение содержания в ОГ бензопирена и др. ПАУ — пропорционально снижению сажи; снижение содержания в ОГ токсичных продуктов неполного сгорания (СО и СН) не менее чем на 15 %; уменьшение удельного расхода топлива на 1,5–3 %.

Для анализа химического состава ОГ был выбран метод молекулярной спектроскопии. При анализе химического состава отработавших газов дизеля наблюдались мутагенные и канцерогенные химические соединения, концентрация которых при использовании ВТЭ значительно уменьшилась на 30–50 %.

Таким образом, разработка эффективных комплексных средств и методов целенаправлен-

ного воздействия на параметры процессов дизельного цикла для выполнения требований по ограничению дымности и токсичности ОГ может послужить средством расширения номенклатуры

применения в дизеле альтернативных топлив как один из способов организации регулирования рабочего процесса двигателя путем изменения физико-химических свойств топлива.

Литература

1. Вредное воздействие на здоровье человека новых загрязнителей окружающей среды. Серия технических докладов, ВОЗ № 586 — Женева, 1998.
2. Данилов А.М. Применение присадок в топливах. М.: Мир, 2005.
3. Сергеев Л.В., Вургафт А.В. Смесеобразование при работе дизелей на водотопливных эмульсиях // — Двигателестроение. — 1990. — № 6.

4. Сафиуллин Р.Н. Устройство приготовления и подачи ВТЭ дизеля автомобиля. Св-во на полезную модель № 14256 от 15.02.2000 г.

5. Сафиуллин Р.Н. Автоматический регулятор устройства приготовления и подачи ВТЭ дизеля автомобиля. Св-во на ПМ. — СПб.; ВАТТ, 2001.

6. Ложкин В.Н. Теория и практика безразборной диагностики и каталитической нейтрализации отработавших газов дизелей. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н., СПбГТУ.

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «DISEL & GAS TURBINE WORLDWIDE»

НОВЫЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРЫ И СТРАТЕГИЯ MTU/MDE

Фирма MTU/MDE проектирует основные и вспомогательные дизель-генераторы на базе двигателей, работающих на дизельном и газообразном топливе. Новое поколение дизелей серии 4000 имеет перспективу увеличения мощности, улучшения экономичности и экологических показателей по сравнению с предыдущим поколением. Речь идет о 12-, 16- и 20-цилиндровых V-образных (с развалом цилиндров 90°) дизелях для генераторов с частотой переменного тока 50 и 60 Гц. Дизели имеют размерность 17/21 и рабочий объем цилиндра 4,77 л. Снижение выбросов вредных веществ достигается за счет совершенствования технологии сгорания в цилиндре и приводит экологические показатели в соответствие с Tier 2 EPA. Содержание твердых частиц снижается до величин менее 50 мг/м³, содержание СО уменьшается вдвое по сравнению с предшествовавшими моделями. Величина NO_x составляет менее 1700 мг/м³ в диапазоне нагрузок от 50 до 100 %. Кроме того, стоимость двигателя снижается на 15%. Повышение мощности составляет 13 % для 16-цилиндровых дизелей и 16% — для 12- и 20-цилиндровых дизелей, т. е. до 1910, 2500, 3490 кВт. Оптимизация топливоподачи позволяет существенно снизить удельный расход топлива. Таким образом, дизель-генератор с 12-цилиндровым дизелем способен заместить агрегат с 16-цилиндровым дизелем с электрической мощностью 1800 кВА, а дизель-генератор с 16-цилиндровым дизелем замещает 20 V4000 с электрической мощностью 2250 кВА. В основе улучшения процесса сгорания лежат улучшенная геометрия поршня, контроль за открытием клапанов и применение системы Common Rail второго поколения. Также важную роль играет электронная система управления дизелем ADEC (Advanced Diesel Engine Control).

Дальнейшее развитие MTU/MDE видит в создании дизелей, работающих на газообразном топливе: природном газе, биогазе, специальных газах, в виде одиночных агрегатов либо работающих в составе когенерационных установок. Потенциальными потребителями этих установок являются страны Европы, в первую очередь ФРГ, Голландия, Великобритания.

НОВЫЕ ГАЗОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ФИРМЫ MAN B&W DIESEL

Откликаясь на современные требования по охране окружающей среды от шума и вредных выбросов, фирма MAN B&W DIESEL недавно представила двигатель V32/40PGI (от performance gas injection — исполнение с газовым впрыском). Мощность двигателя 5400–8100 кВт. Он отвечает требованиям городской среды в части компактности, низкого уровня шума и выбросов вредных веществ. Эффективные показатели двигателя наряду с низкими значениями содержания NO_x предполагают его рентабельное использование и для промышленных нужд. Двигатель имеет ряд особенностей, первой из которых является отказ от искрового зажигания. Вместо этого предкамера содержит калильный элемент — «hot spot», который обеспечивает зажигание поданного в предкамеру газа под высоким давлением на режимах пуска и малых нагрузок, до 30 % от номинальной (термин «калильный элемент» предложен исходя из известного в первой половине XX в. калильного зажигания, применявшегося на нефтяных двигателях — «нефтянках», прим. автора). Пилотный газ, количество которого не превышает 1 % от общего расхода, обеспечивает возникновение пламени, зажигающего топливовоздушную смесь, подаваемую в камеру сгорания. Эффективный КПД составляет свыше 46 %, содержание NO_x менее 250 г/м³. Двигатель может быть в 12- или 16-цилиндровом исполнении с рабочим объемом цилиндра 32,2 л; цилиндровая мощность составляет 430 кВт при частоте вращения 720 об/мин и 450 кВт при 750 об/мин; двигатель оснащен турбокомпрессором MAN B&W NR с постоянным давлением. Среднее эффективное давление составляет 2,24 МПа, что является значительным для двигателей фирмы и уникальным для газовых двигателей. Указанная мощность достигается при использовании топлива с теплотворной способностью 32400 кДж/м³.

Приводятся особенности конструкции двигателя, впускных и выпускных клапанов и питающих топливом систем.

*Материал подготовил
научный редактор к.т.н. Петров А.П.*