

Д. И. Комлач, А. Н. Антоненко, В. В. Голдыбан

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: labpotato@mail.ru*

К РАЗРАБОТКЕ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТРАКТОРОВ И АВТОМОБИЛЕЙ С МАЛОТОКСИЧНЫМ ПРОЦЕССОМ СГОРАНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены основные средства снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизельных двигателей и приведено нетрадиционное новое актуальное решение проблемы снижения токсичности отработавших газов дизельных двигателей мобильных транспортных средств и тракторов за счет совершенствования процесса сгорания топлива в двух разделенных камерах сгорания.

Ключевые слова: рабочий процесс, выбросы вредных веществ, рециркуляция, сажевый фильтр, камера сгорания, малотоксичный процесс сгорания.

D. I. Komlach, A. N. Antonenko, V. V. Goldyban

*RUE "SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: labpotato@mail.ru*

TO THE DEVELOPMENT OF DIESEL ENGINES FOR TRACTORS AND VEHICLES WITH A LOW-TOXIC COMBUSTION PROCESS

Abstract. The article discusses the main means of reducing emissions of harmful substances with exhaust gases of diesel engines and provides an unconventional new topical solution to the problem of reducing the toxicity of exhaust gases of diesel engines of mobile vehicles and tractors by improving the combustion process in two separated combustion chambers.

Keywords: working process, emissions of harmful substances, recirculation, particulate filter, combustion chamber, low-emission combustion process.

Введение

Дизельные двигатели, применяемые на автомобильном транспорте и тракторной технике в качестве энергетических установок, являются одним из существенных источников загрязнения окружающей среды. Присутствующие в отработавших газах (ОГ) токсичные компоненты обладают различными химическими свойствами, по-разному воздействуют на организм человека. Наиболее опасны для человека, животного и растительного мира следующие компоненты ОГ: сажа, бенз(а)пирен, оксиды азота, альдегиды, оксиды углерода и углеводороды. Степень их воздействия на организм человека зависит от концентрации вредных соединений в атмосфере, состояния человека и его индивидуальных особенностей. Таким образом, ОГ дизелей в силу большого количества и высокой токсичности чрезвычайно опасно действуют на здоровье людей, а также на всю окружающую среду. Поэтому в настоящее время одной из важнейших проблем является разработка способов и средств снижения токсичности ОГ дизелей, обладающих высокими показателями по очистке и ресурсу работы.

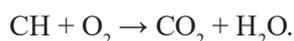
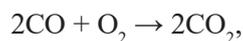
Основная часть

Анализ систем снижения токсичных выбросов дизелей. Основная доля вредных веществ, содержащихся в ОГ дизелей и загрязняющих окружающую среду, состоит из окислов азота NO_x , углеводородов CH , окиси углерода CO , а также углерода C (сажи). Из перечисленных веществ CO , CH и C являются продуктами неполного сгорания топлива. Количество NO_x в выхлопных

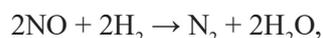
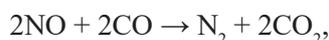
газах связано, в основном, с высокой температурой сгорания топлива. Окислы азота образуются в двигателе при взаимодействии кислорода и азота, содержащихся в воздухе при температуре свыше 1800 °С. Чем выше температура сгорания, тем больше образуется NO_x. На температуру сгорания влияют конструктивные факторы (например, степень сжатия) и режим работы двигателя (состав смеси, нагрузка) [1]. Уменьшение количества и изменение качественного состава вредных веществ, выбрасываемых в окружающую среду с ОГ, достигается целым комплексом мероприятий. Среди них следует отметить ряд конструктивных разработок: специальные конструкции камер сгорания для работы на бедных смесях, в том числе с различными типами форкамер; рециркуляцию ОГ, т. е. подачу их части на вход в двигатель; системы регулирования фаз газораспределения, уменьшающие перекрытие клапанов на пониженных режимах и т. д. Однако даже при использовании в конструкции двигателей всех самых передовых решений удовлетворить нормы токсичности, установленные, например, в США, Японии и странах Европы, не удастся.

Вследствие этого современные автомобили с дизельными двигателями снабжаются каталитическими нейтрализаторами.

Нейтрализатор состоит из носителя, заключенного в корпус. Носитель представляет собой керамический материал (сотовой конструкции или в виде шариков), покрытый тонким слоем катализатора из благородных металлов, например: платины, палладия, родия. При температуре поверхности катализатора свыше 250–300 °С содержащиеся в ОГ окислы углерода СО эффективно окисляются, а их концентрация в выхлопных газах снижается во много раз. Окисление углеводородов СН происходит при более высокой температуре (400 °С):

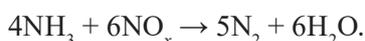


Вместе с тем последовательное ужесточение норм токсичности потребовало создания нейтрализаторов, снижающих не только концентрацию СО и СН, но и одновременно окислов азота NO_x. Такие нейтрализаторы называются трехкомпонентными. Основная проблема заключается в том, что в отличие от указанных выше реакций окисления уменьшение концентраций NO_x является реакциями восстановления:



(при низких значениях коэффициента избытка воздуха $a < 1$)

Для снижения выбросов оксидов азота применяют частичную рециркуляцию ОГ, т. е. перепуск ОГ во впускной трубопровод (английская аббревиатура – EGR). Эта технология позволяет одновременно снижать содержание сажи и NO_x. Другой способ снижения выброса NO_x основан на подаче реагента AdBlue (32,5%-й раствор карбамида (мочевины) в деионированной воде) в выхлопную трубу перед каталитическим нейтрализатором (английская аббревиатура – SCR). Реакции восстановления азота проходят при температуре свыше 350 °С. Расход раствора AdBlue составляет 4–5 % расхода дизельного топлива.



В выхлопных газах дизеля присутствуют, иногда в больших количествах, частицы углерода (сажа). Это происходит из-за наличия зон богатой смеси в струе распыляемого топлива. Сажевыделение дизеля создает характерный черный дым выхлопа и так же, как и другие вещества, ограничивается нормами токсичности. Снижение сажевыделения достигается более ранним впрыском (правда, ограниченным «жесткостью» сгорания и повышением нагрузок на детали) и ограничением подачи насоса. Среди конструктивных мероприятий следует отметить увеличение скорости впрыска и качества распыления топлива за счет увеличения давления подачи, а также электронное регулирование подачи. Дымление двигателя резко возрастает при приближении состава смеси к стехиометрическому ($a = 1$), поэтому дизели, несмотря на то что вблизи $a = 1$

мощность и крутящий момент максимальны, имеют ограничение цикловой подачи топлива по пределу дымления. Для снижения выброса сажи с ОГ выпускной трубопровод дизеля оснащается специальным сажевым фильтром [2].

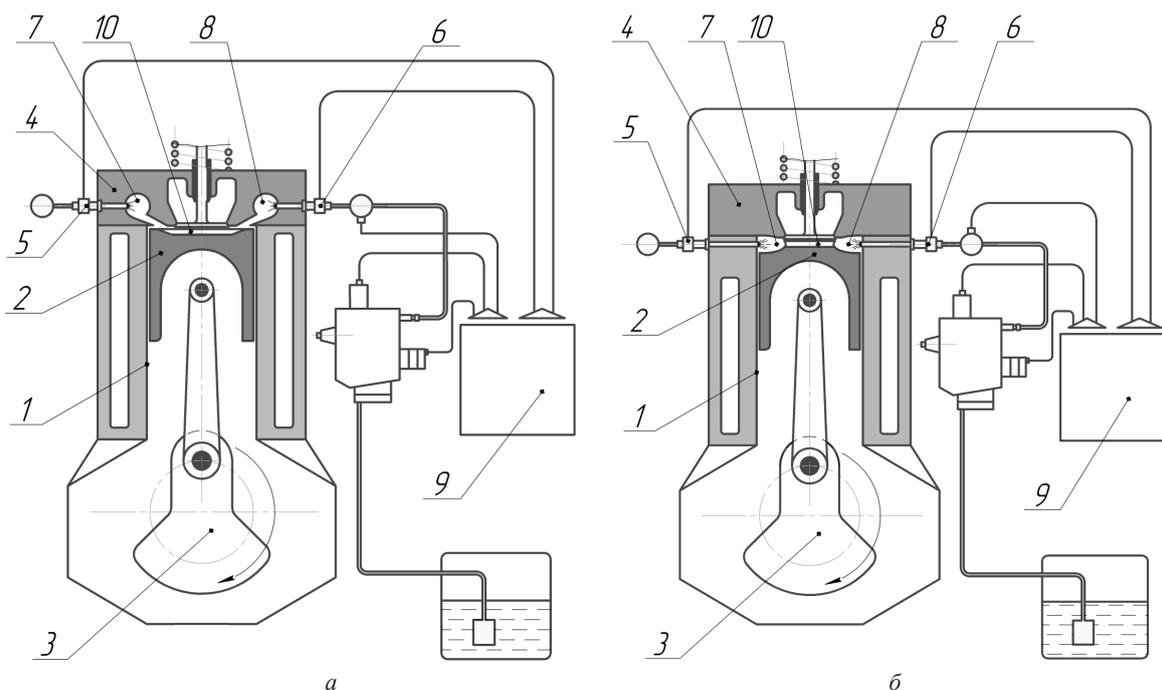
Известно, что токсичность ОГ дизельных двигателей определяется в первую очередь тремя факторами. Первый фактор – низкая температура ОГ и работа на бедных смесях, в результате чего эффективность каталитических нейтрализаторов крайне низкая. Второй фактор – повышенный выброс на некоторых режимах, особенно при прогреве, продуктов неполного сгорания с характерным неприятным запахом (акролеина, альдегидов и др.), многие из которых канцерогенные. Третий фактор – частицы сажи и твердые частицы, которые являются носителями канцерогенов. Одним из наиболее эффективных способов снижения сажеобразования является использование наддува. Все применяемые сегодня системы по снижению токсичных веществ в ОГ имеют высокую стоимость изготовления, малый ресурс, не отвечают в полной мере требованиям стандарта по экологии Евро-6, что требует разработки принципиально новых решений. Экологическая чистота выхлопа должна обеспечиваться конструкцией самого дизельного двигателя и малотоксичным процессом сгорания. Дизельный двигатель при работе на всех режимах должен сам обеспечивать малотоксичный рабочий процесс с минимальным содержанием токсичных компонентов в ОГ. Наиболее значительное влияние на экологические и топливно-экономические показатели дизельного двигателя оказывает процесс сгорания топлива. Это объясняется тем, что основная масса токсичных компонентов ОГ представляет собой продукты горения топливовоздушной смеси.

Описание конструкции дизельного двигателя с малотоксичным процессом сгорания.

Предлагаемый двигатель внутреннего сгорания (см. рисунок) не отличается от традиционного и содержит по меньшей мере один цилиндр 1 с поршнем 2, кинематически связанным с коленчатым валом 3, и головку цилиндра 4. Две электромагнитные форсунки подачи топлива 5 и 6 обеспечивают впрыск топлива в две отдельные камеры сгорания 7 и 8, которые выполнены равного объема. Топливо из бака к электромагнитным форсункам подачи топлива 5 и 6 подается системой топливоподачи к электронным блокам управления подачей топлива 9, позволяющим оптимальным для нагрузочного режима двигателя образом управлять продолжительностью, фазами и законом подачи топлива. Камеры сгорания 7 и 8 соединены между собой перепускным каналом 10 с возможностью выравнивания в них давления во время сгорания топлива только в одной камере сгорания при расположении поршня 2 вблизи верхней мертвой точки. Перепускной канал 10 выполнен в днище поршня 2, хотя он может быть расположен и в головке цилиндра 4. Геометрический объем перепускного канала 10 не превышает 0,5 рабочего объема одной камеры сгорания, например, объема камеры сгорания 7.

Способ работы двигателя внутреннего сгорания осуществляют следующим образом. На максимальной мощности дизельного двигателя электронный блок управления подачей топлива 9 посылает свои импульсы по проводам на катушки электромагнитных форсунок подачи топлива 5 и 6 одновременно как по четным, так и по нечетным рабочим циклам. При этом электромагнитные форсунки подачи топлива 5 и 6 выполняют цикловую подачу топлива в отдельные камеры сгорания 7 и 8. Каждая электромагнитная форсунка подачи топлива 5 и 6 впрыскивает 0,5 расчетной цикловой подачи топлива, рассчитанной по величине воздушного заряда цилиндра двигателя. Во избежание образования большого количества оксидов азота NOx топливо в камерах сгорания 7 и 8 сгорает с некоторым дефицитом свободного кислорода, увеличенным содержанием продуктов неполного сгорания и первичных частиц сажи. При вращении кривошипа коленчатого вала 3 и прохождения поршнем 2 верхней мертвой точки горячая смесь из камер сгорания 7 и 8 выбрасывается в перепускной канал 10, содержащий большое количество сжатого чистого воздуха.

Наличие свободного атомарного кислорода в перепускном канале 10 при высокой температуре смеси (более 1500 °С) обеспечивает полное дожигание продуктов неполного сгорания и первичных частиц сажи в конечной фазе сгорания. Фактически процесс сгорания топлива на максимальных нагрузках в цилиндре предлагаемого двигателя не отличается от сгорания топлива в рабочем цилиндре современного дизеля с разделенной камерой сгорания.

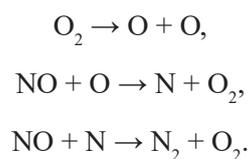


Схемы дизельного двигателя внутреннего сгорания, работающего по предлагаемому способу:
 а – с двумя разделенными вихревыми камерами сгорания, расположенными в головке цилиндров;
 б – с двумя отдельными камерами сгорания, выполненными в поршне рабочего цилиндра; 1 – цилиндр;
 2 – поршень; 3 – коленчатый вал; 4 – головка цилиндра; 5, б – электромагнитные форсунки подачи топлива;
 7, 8 – отдельные камеры сгорания; 9 – электронный блок подачи топлива; 10 – перепускной канал

Полные мощности в обычных условиях эксплуатации мобильной техники используются сравнительно редко: для ускорения автомобиля или при преодолении больших подъемов, а в подавляющем большинстве случаев автомобиль эксплуатируется с частичными нагрузками, связанными с малыми цикловыми подачами топлива.

При работе предлагаемого дизельного двигателя на частичных нагрузках и холостом ходу подачу топлива осуществляют следующим образом: первой электромагнитной форсункой подачи топлива 5 выполняют впрыск топлива только по четным рабочим циклам в первую камеру сгорания 7, а второй электромагнитной форсункой подачи топлива б осуществляют впрыск топлива только по нечетным рабочим циклам во вторую камеру сгорания 8. При этом цикловая подача топлива каждой форсунки соответствует нагрузке и всему воздушному заряду, подвергаемому сжатию в двух камерах сгорания цилиндра 1 дизельного двигателя. На переходных режимах работы одна электромагнитная форсунка подачи топлива может работать как по четным, так и по нечетным рабочим циклам, а вторая электромагнитная форсунка подачи топлива, например, только по нечетным рабочим циклам, и наоборот. Малотоксичный рабочий процесс при работе дизельного двигателя на частичных нагрузках и холостом ходу обеспечивается следующим образом. Для снижения образования оксидов азота NO_x первая стадия сгорания топлива осуществляется в каждой камере сгорания 7 и 8 поочередно через четыре оборота коленчатого вала при обогащенной рабочей смеси. Все топливо одного цикла, рассчитанное электронным блоком управления 9 в соответствии с загрузкой двигателя и зарядом воздуха при формировании обедненной смеси, впрыскивается только одной форсункой подачи топлива в одну из камер сгорания 7 или 8. Вследствие этого рабочая смесь переобогащается топливом и процесс сгорания в первой фазе сгорания топлива осуществляется в условиях недостатка кислорода при более низкой температуре, а вторая стадия диффузионного сгорания протекает в перепускном канале 10 при обедненной смеси и интенсивной турбулизации топливовоздушной смеси за счет скоростного истечения чистого воздуха из той камеры сгорания, в которой электромагнитная форсунка

пропускает впрыск топлива. Такое исполнение рабочего процесса в цилиндре дизельного двигателя в условиях частичных нагрузок и переходных режимов тормозит процесс эмиссии NO_x из-за дефицита кислорода на первой стадии сгорания топлива в условиях высоких температур при положении поршня около верхней мертвой точки, когда имеются наилучшие условия для образования NO_x , а на второй стадии, в период догорания топлива, процесс образования оксидов азота NO_x прекращается в результате снижения общего температурного уровня рабочих газов в цилиндре двигателя из-за их расширения, в начале движения поршня к нижней мертвой точке. Снижение выбросов промежуточных продуктов неполного сгорания углеводородных топлив происходит за счет перетекания большого количества сжатого воздуха, содержащего свободный кислород из второй камеры сгорания в перепускной канал 10, турбулизации смеси в конечной фазе сгорания и ускорением реакций окисления. Следует отметить, что при диссоциации молекулы кислорода и образовании атомарного кислорода в перепускном канале 10 оксид азота вступает с ним в реакцию и распадается до молекул азота и кислорода:



Высокая степень использования кислорода позволяет достигнуть на частичных нагрузках и холостом ходу более низких, чем у дизелей, оборудованных одной форсункой подачи топлива на один цилиндр, показателей содержания токсичных веществ в ОГ. Сокращение периода задержки воспламенения топлива обеспечивается существенным сокращением степени рециркуляции (или ее отсутствием) и снижением количества инертных газов в рабочем воздушном заряде при возрастании в нем процентного содержания молекул кислорода в момент начала впрыска топлива. Необходимо отметить, что в предлагаемом малотоксичном рабочем процессе в начальный период сгорания рабочая смесь содержит высокий процент содержания кислорода при его общем количественном дефиците, что снижает интенсивность тепловыделения, температуру рабочих газов и образование оксидов азота NO_x при соблюдении условия минимальной задержки воспламенения топлива. Вместе с тем в конечной фазе сгорания топлива, в период диффузного сгорания при обедненной рабочей смеси, за счет скоростного истечения чистого воздуха из второй камеры сгорания, где электромагнитная форсунка подачи топлива не выполняет впрыск топлива в камеру сгорания, и турбулизации рабочей смеси интенсивно нарастают скорость сгорания и тепловыделение. Снижение количества инертных газов в рабочем воздушном заряде при возрастании процентного содержания кислорода в рабочей смеси во второй фазе процесса сгорания обеспечивает высокую скорость сгорания топлива, повышает температуру рабочих газов и их давление в начале рабочего хода, что увеличивает среднее индикаторное давление цикла и положительно сказывается на топливной экономичности дизеля. При этом высокая температура рабочей смеси при избытке кислорода в период догорания топлива в начале расширения обеспечивает полное сгорание компонентов несгоревшего топлива и минимальное содержание в ОГ углеводородов и сажи. Малотоксичный рабочий процесс сгорания характеризуется умеренной скоростью тепловыделения в первом периоде сгорания и возрастанием ее интенсивности во втором периоде, что существенно снижает образование вредных веществ в цилиндрах дизеля, а топливо в цилиндрах сгорает до конечных безвредных продуктов.

Заключение

Таким образом, согласованная работа двух электромагнитных форсунок подачи топлива в две отдельные камеры сгорания равного объема, сообщающихся между собой с помощью перепускного канала, выполненного в днище поршня, реализуют в наибольшей мере малотоксичный процесс сгорания топлива в дизельном двигателе, обеспечивающий минимальный уровень токсичности и дымности дизеля. Предлагаемая организация протекания процесса сгорания топлива на переходных режимах и холостом ходу двигателя внутреннего сгорания с впрыском топлива

в камеру сгорания обеспечивает требуемую экологическую безопасность и топливную экономичность. Новизна, или отличительная особенность, изобретения – это наличие в каждом рабочем цилиндре дизельного двигателя вместо одной-двух отдельных, равных по объему камер сгорания с двумя электромагнитными форсунками подачи топлива. Тогда малотоксичный процесс сгорания топлива в дизельном двигателе, работающем с переменным режимом нагрузок, заключается в том, что на холостом ходу и частичных нагрузках топливо сгорает поочередно, например, по четным рабочим циклам – в первой камере сгорания, а по нечетным рабочим циклам – во второй камере сгорания. При этом в камере сгорания, куда не впрыскивается топливо, сжимается атмосферный воздух с остатками ОГ, оставшихся в камере сгорания после сгорания в ней топлива в предыдущем рабочем цикле. В процессе расширения эта камера очищается от остатков ОГ (они смешиваются со сжатым воздухом и вытесняются в рабочий цилиндр). После очередного газообмена в следующем рабочем цикле при сгорании топлива в этой камере сгорания остаточные газы будут отсутствовать, что уменьшает задержку воспламенения и положительно сказывается на малотоксичном сгорании топлива. Вместе с тем атмосферный воздух, содержащий большое количество активных молекул свободного кислорода, при перетекании в перепускной канал и рабочий цилиндр в конечном периоде процесса сгорания способствуют турбулизации топливовоздушной смеси в перепускном канале и мгновенно дожигают при высокой температуре и давлении промежуточные продукты неполного сгорания топлива, включая сажу и окислы углерода. Выделившаяся при этом тепловая энергия повышает температуру сжатого воздуха и среднее индикаторное давление цикла, что также увеличивает топливную экономичность дизельного двигателя.

Список использованных источников

1. Лиханов, В. А. Снижение токсичности автотракторных дизелей / В. А. Лиханов, А. М. Сайкин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Колос, 1994. – С. 73–79.
2. Дмитриевский, А. Снижение токсичности отработавших газов современных дизелей [Электронный ресурс] / А. Дмитриевский // Основные средства. – 2016. – Режим доступа: <https://os1.ru/article/7221-snijenie-toksichnosti-otrabotavshih-gazov-sovremennyh-dizeley>. – Дата доступа: 02.08.2021.