

МОДЕРНИЗАЦИЯ ФОРКАМЕРНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Антоненко А.Н.¹

¹Антоненко Александр Николаевич – сотрудник ¹РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация: в статье приведено нетрадиционное новое актуальное решение проблемы снижения токсичности отработавших газов автомобильных двигателей внутреннего сгорания за счет совершенствования процесса сгорания топлива.

Ключевые слова: отработавшие газы, выбросы вредных веществ, камера сгорания, электромагнитные форсунки подачи топлива, малотоксичный рабочий процесс.

MODERNIZATION OF FORMULAR AUTOMOTIVE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Antonenko A.N.¹

¹Antonenko Alexander Nikolaevich - Researcher ¹RUP "Scientific and Production Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract: the article presents an unconventional new topical solution to the problem of reducing the toxicity of exhaust gases of automobile internal combustion engines by improving the process of fuel combustion.

Keywords: exhaust gases, emissions of harmful substances, combustion chamber, electromagnetic fuel injectors, low-toxic working process.

УДК 621.372.62/43

Современный легковой автомобиль в обычных условиях эксплуатации работает на полной нагрузке сравнительно редко (не более 15%, а многие опытные автолюбители при бережливой эксплуатации вообще не используют режим полного газа), а в подавляющем большинстве случаев машина



эксплуатируется на частичных режимах, связанных с малыми открытиями воздушной заслонки и высокими значениями разрежения во впускном коллекторе. Вместе с тем, работа двигателя внутреннего сгорания с принудительным зажиганием на малых нагрузках связана с повышенным содержанием инертных газов в рабочей смеси и возрастанием насосных потерь, связанных с условиями газообмена в рабочем цилиндре, результатом чего являются повышенные индикаторные удельные расходы топлива и высокое содержание наиболее токсических веществ в отработавших газах. Высокое содержание инертных газов (остаточные газы) в камере сгорания снижает скорость горения рабочей смеси, что отрицательно сказывается на использовании тепла из-за переноса сгорания на линию расширения. В то же время повышается температура отработавших газов и содержание в них окиси углерода, несгоревших углеводородов и канцерогенных веществ.

Задача снижения расхода топлива и выброса углесодержащих продуктов неполного сгорания топлива (окись углерода CO , углеводороды C_nH_m и сажа) находится в некотором противоречии с задачей уменьшения эмиссии оксидов азота (NO_x) и снижения жесткости сгорания. Непрерывное совершенствование двигателей внутреннего сгорания и их рабочих процессов привело к созданию новых эффективных рабочих процессов, обеспечивающих высокую топливную экономичность и умеренное содержание токсических компонентов в отработавших газах. Улучшение протекания рабочего процесса двигателей, работающих на легком топливе, достигается при разделении камеры сгорания на две полости, одна из которых заполнена обогащенной смесью, а другая обедненной смесью или воздухом в зависимости от нагрузки двигателя. Свечу при этом располагают в полости с обогащенной смесью [1]. Этот принцип положен в основу процесса с форкамерно–факельным воспламенением. Топливную смесь в форкамере зажигают свечой, а основной заряд в камере сгорания воспламеняется факелом горячей смеси, выбрасываемым из форкамеры. Присутствие в основной камере обедненной смеси с большим количеством свободного кислорода приводит к уменьшению в отработавших

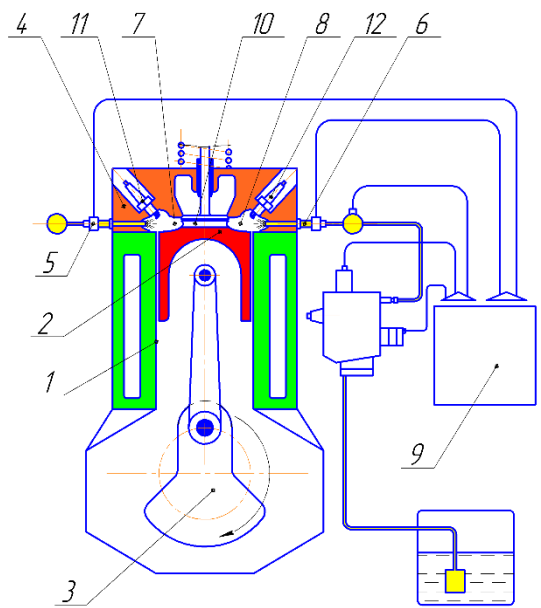


газах окиси углерода и углеводородов. Вместе с тем следует отметить, что в данном рабочем процессе имеют место повышенные тепловые потери, связанные с интенсивным охлаждением форкамеры и дополнительными затратами энергии на перетекание горячих газов из форкамеры в основную полость.

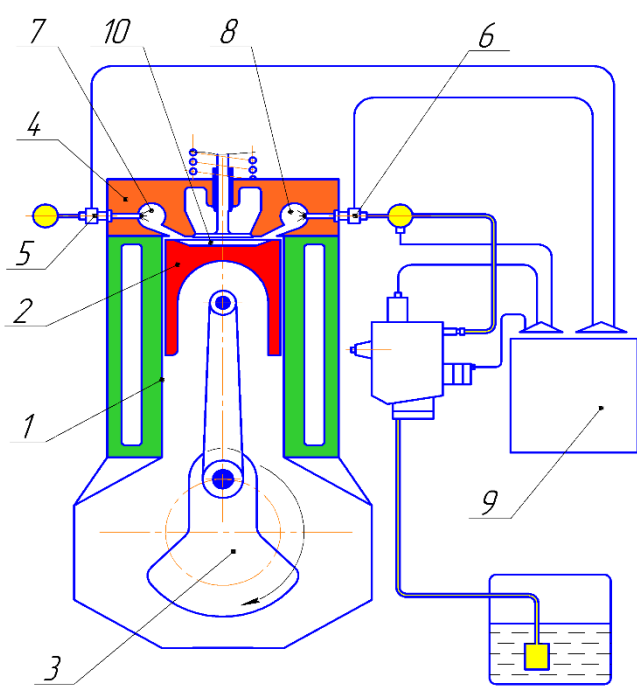
Существенного улучшения протекания процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания транспортных средств можно добиться путем модернизации форкамерного двигателя. В предлагаемом двигателе внутреннего сгорания камера сжатия разделяется поршнем при его положении в верхней мертвой точке на две равные по объему камеры сгорания. Каждая камера сгорания снабжена отдельной системой подачи топлива с электромагнитной форсункой и системой зажигания со свечой зажигания, установленной в каждой камере сгорания [2, 3]. Рабочий процесс в предлагаемом двигателе при работе на полной нагрузке и максимальной мощности ничем не отличается от рабочего процесса с форкамерно–факельным воспламенением, за исключением того, что по нечетным рабочим циклам первая камера сгорания является форкамерой с обогащенной рабочей смесью, а по четным рабочим циклам уже вторая камера сгорания является форкамерой, и наоборот.

На фиг. 1 представлена схема автомобильного двигателя внутреннего сгорания с двумя камерами сгорания равного объема, малотоксичным процессом сгорания топлива и принудительным зажиганием; на фиг. 2 представлена схема автомобильного дизельного двигателя с малотоксичным процессом сгорания топлива и двумя отдельными вихревыми камерами сгорания равного объема; на фиг. 3 представлена схема автомобильного дизельного двигателя с малотоксичным процессом сгорания топлива и двумя камерами сгорания равного объема, выполненными в поршне рабочего цилиндра.



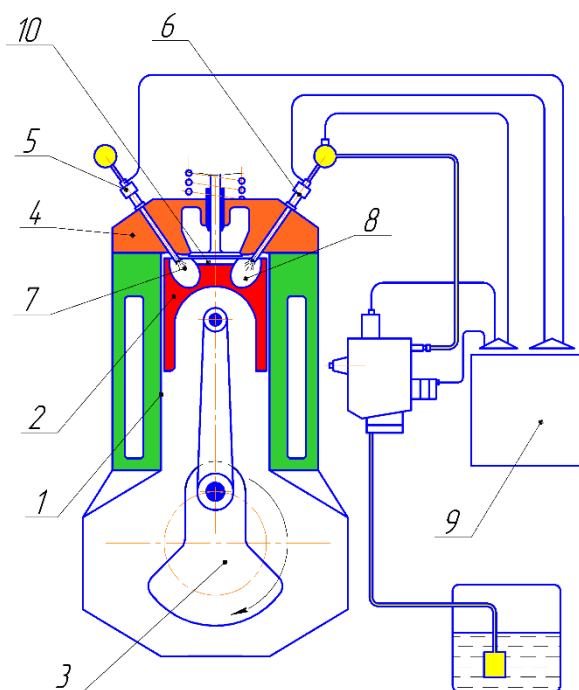


Фиг. 1



Фиг. 2





Фиг. 3

Сам двигатель внутреннего сгорания (фиг. 1-3) не отличается от традиционного и содержит по меньшей мере один цилиндр 1 с поршнем 2, кинематически связанный с коленчатым валом 3 и головку цилиндра 4. Две электромагнитные форсунки подачи топлива 5 и 6 обеспечивают впрыск топлива в две отдельные, равные по объему, камеры сгорания 7 и 8. Топливо из бака к электромагнитным форсункам подачи топлива 5 и 6 подается системой топливоподачи с электронным блоком 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 может быть расположен и в головке цилиндра 4. Геометрический объем перепускного канала 10 не превышает 0.3 рабочего объема одной камеры сгорания, например, объема



камеры сгорания 7. В двигателе внутреннего сгорания с принудительным зажиганием (фиг. 1) в камерах сгорания 7 и 8 установлены свечи зажигания 11 и 12 с подачей напряжения на них как по всем четным, так и по всем нечетным рабочим циклам в постоянном режиме с возможностью изменения угла опережения зажигания.

При работе двигателя внутреннего сгорания с принудительным зажиганием на максимальной мощности 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, которые выполняют цикловую подачу топлива в отдельные камеры сгорания 7 и 8. Впрыск топлива осуществляется на такте сжатия с углом опережения впрыскивания $60 \pm 10^\circ$ при продолжительности впрыскивания 40° поворота кривошипа. Подача искры на свечи зажигания 11 и 12 происходит как по четным, так и по нечетным рабочим циклам без каких-либо исключений. При вращении кривошипа коленчатого вала 3 и расположении поршня 2 вблизи верхней мертвой точки горючая смесь в камерах сгорания 7 и 8 сгорает оптимальным для нагрузочного режима двигателя образом и максимально увеличивает давление рабочих газов в рабочем цилиндре 1. Необходимо отметить, что по нечетным рабочим циклам первая камера сгорания 7 может являться форкамерой с обогащенной рабочей смесью ($\alpha = 0,7 - 0,9$), а во вторую камеру 8 тогда подается обедненная смесь ($\alpha = 1,2 - 1,7$), при этом по четным рабочим циклам уже вторая камера сгорания является форкамерой с обогащенной рабочей смесью ($\alpha = 0,7 - 0,9$) и наоборот – в первую камеру сгорания 7 подается обедненная смесь ($\alpha = 1,2 - 1,7$). Наличие в «форкамере» обогащенной смеси препятствует повышенному образованию оксидов азота, а существование во второй камере сгорания обедненной смеси приводит к уменьшению в отработавших газах окиси углерода и токсических веществ вида C_nH_m .

При работе двигателя внутреннего сгорания с принудительным зажиганием на частичных нагрузках и холостом ходу подачу топлива



осуществляют следующим образом: первой электромагнитной форсункой подачи топлива 5 выполняют впрыск топлива по четным рабочим циклам в первую камеру сгорания 7, исключая впрыск топлива по нечетным рабочим циклам, а второй электромагнитной форсункой подачи топлива 6 осуществляют впрыск топлива только по нечетным рабочим циклам во вторую камеру сгорания 8, исключая впрыск топлива по четным рабочим циклам, при этом цикловая подача топлива каждой форсунки соответствует воздушному заряду, подвергаемому сжатию только в одной камере сгорания. 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 процесс сгорания топлива в автомобильном двигателе внутреннего сгорания с принудительным зажиганием при работе на частичных нагрузках и холостом ходу обеспечивается следующим образом. На холостом ходу и частичных нагрузках по нечетным рабочим циклам в первой камере сгорания 7 рабочего цилиндра 1 вместо рабочей смеси сжимается свежий воздух с небольшим количеством остаточных газов. В результате сжатия чистого воздуха, за счет смешивания его с остаточными газами и контакта с наиболее нагретыми деталями двигателя (выпускные клапаны, свечи зажигания, стенки камеры сгорания), происходит повышение его температуры и давления. В это время температура наиболее разогретых деталей камеры сгорания двигателя снижается, что положительно сказывается на их работе и тепловом состоянии двигателя. При обратном ходе поршня 2 к нижней мертвой точке сжатая и нагретая смесь чистого воздуха с остаточными газами расширяется и смешивается с продуктами процесса сгорания, происходящего во второй камере сгорания 8. Температура и давление этой смеси достигает максимальных значений, и при наличии большого количества свободного кислорода, поступающего в цилиндр из первой камеры сгорания 7, все промежуточные компоненты неполного сгорания топлива, в том числе сажа и окиси углерода CO мгновенно сгорают, а полученное тепло идет на увеличение



внутренней энергии смеси чистого воздуха с остаточными газами. Вся накопленная энергия рабочих газов в процессе расширения трансформируется в механическую работу. Отработавший газ покидает цилиндр 1 двигателя при очередном ходе поршня 2 к верхней мертвой точке, после чего выпускной клапан (на схеме не показан) закрывается. Процесс наполнения, следующий за процессом выпуска, в значительной степени предопределяет мощностные и экологические показатели двигателя внутреннего сгорания с принудительным зажиганием. Наполнение цилиндра свежим воздухом происходит без дросселирования воздушного потока при открытой воздушной заслонке (за исключением холостого хода), что снижает коэффициент остаточных газов, гидравлическое сопротивление впускной системы и повышает механический к.п.д. двигателя внутреннего сгорания. Низкое содержание остаточных газов в камере сгорания увеличивает скорость распространения пламени, благоприятно сказывается на процессе сгорания, увеличивает теплоиспользование и экономичность двигателя. На частичных нагрузках в процессе сжатия атмосферный воздух сжимается одновременно в обеих камерах сгорания 7 и 8, а топливо впрыскивается только в одну из камер сгорания. Вследствие чего во второй камере происходит ее продувка и охлаждение свежим воздухом. Вместе с тем в первый период сгорания топлива в первой камере сгорания начинает интенсивно нарастать давление рабочих газов, которые благодаря перепускному каналу 10 частично вытесняются во вторую камеру сгорания, сглаживая скачек давления и температуру рабочей смеси, предотвращая детонационное сгорание. Геометрический объем перепускного канала 10 составляет не более 0,3 рабочего объема одной камеры сгорания. При очередном процессе сжатия и подачи топлива в эту камеру сгорания, содержание остаточных газов в рабочей смеси окажется минимальным, а процесс воспламенения и сгорания топлива – оптимальным, что положительно скажется на экономичности и экологичности двигателя внутреннего сгорания с принудительным зажиганием. Высокая температура рабочей смеси при избытке кислорода в период догорания топлива обеспечивает полное сгорание горючих компонентов несгоревшего топлива и



минимальное содержание в отработавших газах углеводородов и сажи. Кроме того, поочередное сгорание рабочей смеси в двух камерах сгорания позволяет регулировать мощность, развиваемую двигателем внутреннего сгорания с принудительным зажиганием, не прибегая к дросселированию воздушного потока открытой воздушной заслонкой (за исключением холостого хода), что способствует снижению насосных потерь и повышению экономичности. Очевидно, что именно пропуск сгорания в одной камере сгорания обеспечивает состав рабочей смеси с малым содержанием инертных газов, так как остаточные газы от нечетных рабочих циклов состоят из свежего воздуха и только частично – из продуктов сгорания. Вследствие этого коэффициент остаточных газов при работе двигателя на холостом ходу и частичных нагрузках резко снижается, а коэффициент избытка воздуха повышается, что благоприятно сказывается на процессе сгорания. Сгорание топлива происходит с некоторым дефицитом свободного кислорода на первой стадии сгорания при положении поршня около верхней мертвой точки, когда имеются наилучшие условия для образования оксидов азота, и ускорением реакций окисления промежуточных продуктов сгорания углеводородных топлив при повышенной турбулизации смеси в надпоршневом пространстве во втором периоде сгорания в самом начале расширения, когда температура рабочих газов не повышается из-за увеличения объема камеры сгорания [4]. Следовательно, при смешивании сжатого воздуха, содержащего в большом количестве свободные молекулы кислорода, с горючей смесью во втором периоде сгорания не приводит к эмиссии окислов азота, вследствие снижения температуры рабочих газов в начале процесса расширения.

Таким образом наличие в каждом рабочем цилиндре автомобильного двигателя внутреннего сгорания вместо одной – двух отдельных, равных по объему камер сгорания определяет малотоксичный процесс сгорания топлива в автомобильном двигателе внутреннего сгорания, работающем с переменным режимом нагрузок, заключающийся 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 холодный воздух с остатками отработавших газов, оставшихся в камере сгорания после сгорания в ней топлива в предыдущем рабочем цикле. Сжатый воздух охлаждает детали камеры сгорания, уменьшая потери тепловой энергии, уносимой с охлаждающей средой. В процессе расширения остатки отработавших газов смешаются со сжатым воздухом и вытиснятся в надпоршневое пространство рабочего цилиндра. После очередного газообмена в следующем рабочем цикле при сгорании топлива в этой камере сгорания остаточные газы будут отсутствовать, что положительно скажется на процессе сгорания топлива. Сжатый в камере сгорания атмосферный воздух, благодаря содержанию активных молекул свободного кислорода, при перемещении в перепускной канал и рабочий цилиндр в конечный период процесса сгорания при повышенной турбулизации горючей смеси мгновенно дожигает при высокой температуре и давлению промежуточные продукты сгорания топлива и окись углерода CO до конечных компонентов сгорания топлива – воды и углекислого газа. Выделившаяся при этом тепловая энергия повысит температуру сжатого воздуха и среднее индикаторное давление цикла, что увеличит к.п.д. двигателя. В малотоксичном рабочем цикле двигателя внутреннего сгорания с принудительным зажиганием воздушная заслонка открыта (кроме холостого хода), процесс газообмена рабочего цилиндра осуществляется с меньшим разряжением воздушного потока и с минимальными потерями крутящего момента, что также повышает экономичность. Согласованная работа двух электромагнитных форсунок подачи топлива в две отдельные камеры сгорания равного объема реализует в наибольшей мере малотоксичный процесс сгорания топлива автомобильного двигателя внутреннего сгорания с непосредственным впрыском топлива в камеру сгорания, работающем с переменным режимом нагрузок, и обеспечивает минимальный уровень токсичности при высокой экономичности во всем диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы двигателя транспортных средств.



Малотоксичный процесс сгорания топлива в автомобильном дизельном двигателе с непосредственным впрыском топлива в камеру сгорания осуществляется следующим образом.

Главным токсичным компонентом отработавших газов дизелей являются окислы азота NO_x . Существенное влияние на эмиссию оксидов азота в дизеле оказывает наличие свободного кислорода в топливо–воздушной смеси и высокая температура в камере сгорания. С другой стороны, при дефиците свободного кислорода в процессе диффузионного горения образуется больше сажи и соединений вида C_nH_m .

В предлагаемом автомобильном дизельном двигателе (фиг. 2,3) при работе на номинальной и максимальной мощности электронный блок управления 9 посылает свои импульсы по проводам на катушки электромагнитных форсунок подачи топлива 5 и 6, которые одновременно как по четным, так и по нечетным рабочим циклам 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 и нагрузке. Во избежание образования большого количества оксидов азота NO_x топливо в камерах сгорания 7 и 8 сгорает с умеренным недожогом и увеличенным содержанием продуктов неполного сгорания и первичных частиц сажи. При вращении кривошипа коленчатого вала 3 и прохождения поршнем 2 верхней мертвой точки горючая смесь из камер сгорания 7 и 8 будет выброшена в цилиндр в перепускной канал 10, содержащий небольшое количество сжатого чистого воздуха. Геометрический объем перепускного канала 10 составляет не более 0,3 рабочего объема одной камеры сгорания 7. Наличие свободного атомарного кислорода при высокой температуре смеси (более 1600°C) обеспечит полное дожигание продуктов неполного сгорания и первичных частиц сажи в конечной фазе сгорания. Необходимо отметить, что сгорание топлива в камерах сгорания 7 и 8 на полной мощности происходит с некоторым дефицитом кислорода при



обогащенной топливно-воздушной смеси. Такое протекание рабочего процесса в камере сгорания не приводит к эмиссии оксидов азота NO_x .

При работе дизельного двигателя на частичных нагрузках и холостом ходу подачу топлива осуществляют следующим образом: первой электромагнитной форсункой подачи топлива 5 выполняют впрыск топлива по четным рабочим циклам в первую камеру сгорания 7, исключая впрыск топлива по нечетным рабочим циклам, а второй электромагнитной форсункой подачи топлива 6 осуществляют впрыск топлива по нечетным рабочим циклам во вторую камеру сгорания 8, исключая впрыск топлива по четным рабочим циклам, при этом цикловая подача топлива каждой форсунки соответствует всему воздушному заряду, подвергаемому сжатию в двух камерах сгорания. 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. 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 в условиях недостатка кислорода за фронтом пламени. Вторая стадия диффузионного сгорания протекает в надпоршневом пространстве при обедненной смеси и интенсивной турбулизации топливно-воздушной смеси за счет скоростного истечения чистого воздуха из второй камеры сгорания, где электромагнитная форсунка подачи топлива не выполняет впрыск топлива в камеру сгорания. Такое исполнение рабочего процесса в цилиндре дизельного двигателя в условиях частичных нагрузок и переходных режимов тормозит процесс образования NO_x из-за дефицита кислорода на первой стадии сгорания топлива в условиях высоких температур, а на второй стадии в период догорания топлива в самом начале расширения процесс образования оксидов азота NO_x прекращается в результате снижения общего температурного уровня рабочих газов в цилиндре двигателя при их расширении. Снижение содержания продуктов неполного сгорания в отработавших газах происходит за счет выброса



большого количества свободного кислорода из второй камеры сгорания и турбулизации горючей смеси в конечной фазе сгорания. Высокая степень использования кислорода позволяет достигнуть на частичных нагрузках и холостом ходу более низких, чем у дизелей, оборудованных одной камерой сгорания и одной электромагнитной форсункой подачи топлива на один цилиндр, показателей содержания токсичных веществ в отработавших газах. 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 активного атомарного кислорода в момент начала впрыска топлива. Необходимо отметить, что в предлагаемом малотоксичном процессе сгорания топлива в начальный период сгорания рабочая смесь содержит высокий процент содержания кислорода при его общем количественном дефиците, что снижает интенсивность тепловыделения и температуру рабочих газов при соблюдении условия минимальной задержки воспламенения топлива. Температура рабочих газов в первый период сгорания также снижается за счет перемещения некоторой части рабочих газов по перепускному каналу 10 в камеру сгорания со сжатым воздухом при пропуске впрыска топлива и выравнивании в них давления. Кроме того, камера сгорания со сжатым воздухом работает как амортизатор, сглаживая пики давлений и максимальную температуру рабочих газов в первый период сгорания топлива в соединенной перепускным каналом 10 камере сгорания с протекающим процессом сгорания. 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 и ее турбулизации, интенсивно нарастает скорость сгорания и тепловыделение. Этому также способствует снижение количества инертных газов в рабочем воздушном заряде при возрастании процентного содержания атомарного кислорода в рабочей смеси. Высокая скорость сгорания топлива повышает температуру рабочих газов



и их давление в начале рабочего хода, что увеличивает среднее индикаторное давление цикла и термический к.п.д. дизеля. Высокая температура рабочей смеси при избытке кислорода в период догорания топлива обеспечивает полное сгорание компонентов несгоревшего топлива и минимальное содержание в отработавших газах углеводородов и сажи.

Суммируя изложенное, заключаем, что малотоксичный процесс сгорания топлива в дизельном двигателе транспортных средств обеспечивает существенное снижение токсичности отработавших газов при работе на частичных нагрузках и холостом ходу за счет поочередного впрыска топлива в две отдельные камеры сгорания электромагнитными форсунками подачи топлива. Фактически сгорание топлива в предлагаемом двигателе протекает с некоторым дефицитом кислорода на первой стадии сгорания, когда имеются наилучшие условия для образования оксидов азота, и активным окислением промежуточных продуктов сгорания топлива, включая сажу при повышенной турбулизации топливо–воздушной смеси, обеспечивающей интенсивное протекание реакций диффузного сгорания в самом начале процесса расширения.

Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания. Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова. Москва «Машиностроение», 1985–С.118–120.
2. Евразийская заявка, № 202100153/26
3. Международная заявка, PCT/ВУ 2021/000005
4. Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. – 2-е изд., испр., и доп. – Москва «Колос», 1994 – С. 73-79..

