

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ НА ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ

В.Г. Камалтдинов, С.С. Никифоров

TEST RIG FOR RESEARCH WORK PROCESS OF DIESEL ENGINE ON STARTING CONDITIONS

V.G. Kamaltdinov, S.S. Nikiforov

Разработан и изготовлен оригинальный стенд на основе одноцилиндрового дизеля с системой факельного подогрева и электроразрядной системой подготовки и воспламенения топлива, позволяющий проводить исследования рабочего процесса на пусковых режимах: при низких стационарных частотах вращения коленчатого вала и при его разгоне. Разработана методика проведения экспериментальных исследований процесса сгорания при воспламенении от сжатия и при плазменно-факельном зажигании в условиях, моделирующих холодный запуск полноразмерного транспортного дизеля.

Ключевые слова: дизель, холодный пуск, процесс сгорания, воспламенение.

The original one-cylinder diesel engine test rig with a torch heating system and electrodischarge fuel ignition was developed and built. It is helpful for work process proving on starting conditions at low bent shaft rpm and its acceleration. Special techniques were performed during the experimental proving of combustion process at compression ignition and transferred arc plasma torch ignition under conditions of full-sized transport diesel engine cold starting.

Keywords: Diesel engine, cold start of engine, process of combustion, inflammation.

Известно, что эффективная работа любого двигателя внутреннего сгорания обеспечивается нормальным протеканием рабочего процесса во всем диапазоне нагрузочных и скоростных режимов. Наибольшие трудности в организации рабочего процесса двигателя с воспламенением от сжатия возникают на пусковых режимах, когда температура рабочего тела в цилиндре значительно меньше, чем на других режимах. В сочетании с малой частотой вращения коленчатого вала (КВ) и другими факторами и параметрами, формирующими рабочий процесс при пуске дизеля [1], это ухудшает процессы смесеобразования, воспламенения и сгорания. При отрицательных температурах окружающей среды ($T_{\text{окр}} \leq 258 \text{ K}$) в результате неблагоприятного сочетания и взаимного влияния отдельных факторов часто возникают критические ситуации, когда надежность воспламенения и эффективность сгорания топлива в цилиндре резко падают, и дизель не запускается. Поэтому необходимо так организовывать рабочий процесс, чтобы не только исключить такую опасность, но и минимизировать энергетические и другие затраты на процесс холодного пуска дизеля.

В настоящее время вычислительные возможности современных компьютеров позволяют решить эту проблему с помощью математического моделирования. Но для эффективного его использования необходимо произвести физическое моделирование основных процессов в натурных испытаниях и получить достоверные экспериментальные данные для дизеля данного типа. Исследования рабочего процесса на полноразмерном дизеле затрудняются тем, что в условиях ограниченного крутящего момента, развиваемого пусковым устройством при низких температурах, наблюдаются падения частоты вращения КВ до $20...30 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 1). Мгновенная частота вращения колеблется от $100...130 \text{ мин}^{-1}$ на ходе расширения при $80...90$ градусах поворота коленчатого вала (град п.к.в.) после верхней мертвой точки (ВМТ), до $20...30 \text{ мин}^{-1}$ при подходе поршня к положению 20 град п.к.в. до ВМТ. В момент начала впрыска топлива мгновенная частота вращения КВ составляет $40...60 \text{ мин}^{-1}$.

Неравномерное вращение КВ затрудняет математическое моделирование неустановившихся переходных процессов в дизеле и обработку экспериментального материала. В случае же рав-

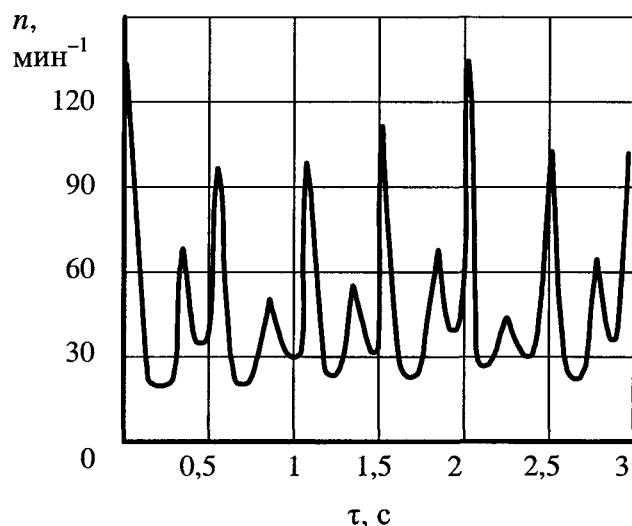


Рис. 1. Зависимость мгновенной частоты вращения коленчатого вала n от времени прокрутки τ при холодном пуске дизеля 12Ч15/18 сжатым воздухом

Для моделирования условий сжатия, характерных для полноразмерных дизелей типа 12ЧН15/18, 12ЧН15/16 с $\epsilon_r = 12$ при $T_{\text{окр}} = 258$ К, на ОЦД 1Ч15/16 при $T_{\text{окр}} = 293$ К степень сжатия последнего уменьшена до $\epsilon_r = 8$. При этом давление конца сжатия в цилиндре ОЦД получается заметно меньше – 0,8...1,1 МПа вместо 1,1...1,4 МПа как на полноразмерном дизеле, что несколько ухудшает условия смесеобразования и воспламенения. Однако, более высокая температура стенок объема сжатия ОЦД (~293 К вместо 258 К) уменьшает градиент температур в топливно-воздушном слое, прилегающем к поверхности объема сжатия, и тем самым облегчает условия смесеобразования и воспламенения в камере сгорания. Таким образом, условия для смесеобразования и воспламенения в ОЦД с $\epsilon_r = 8$ достигаются близкими к реальным условиям холодного пуска форсированных дизелей типа 12ЧН15/18, 12ЧН15/16 с $\epsilon_r = 12$.

Для реализации задачи получения экспериментальных индикаторных диаграмм рабочего цикла транспортного дизеля на пусковых режимах разработан стенд (рис. 2), включающий в себя ОЦД 1Ч15/16, поз. 1, с электроприводом и системы: топливоподдачи, масляную, охлаждения, выпуска отработавших газов, а также измерительный комплекс.

Для равномерного вращения КВ с низкой частотой (от 10 до 100 мин⁻¹) от электродвигателя постоянного тока 34 типа ПН-205 применена открытая зубчатая передача 36 с передаточным отношением 14. Подключение ведущей шестерни через стартерный механизм 32, изготовленный на базе стартера СТ16М-24В, позволило автоматически выключать передачу при исследовании процесса запуска ОЦД.

В этом случае дизель может разгоняться самостоятельно уже с первого оборота без поддержки моментом инерции электропривода. При блокировке стартерного механизма (для исследований на стационарных скоростных режимах) момент инерции якоря электродвигателя и автоматический его переход в режим генератора обеспечивают поддержание частоты вращения КВ на заданном уровне в течение всего рабочего цикла дизеля. Регулирование частоты вращения электродвигателя 34 и, соответственно, КВ ОЦД осуществляется изменением тока якоря с помощью автотрансформатора АТР типа АОМН-40-220-75 У4.

На дизеле установлен поршень с камерой сгорания типа Гессельман. Низкая степень сжатия ($\epsilon_r = 8$) получена за счет увеличения толщины прокладки газового стыка. Фазы газораспределения соответствуют регулировкам дизеля В-55. Системы ОЦД изготовлены на базе штатных систем дизеля 12ЧН15/18 и отвечают общепринятым требованиям. Топливная аппаратура дизеля состоит из отсека 15-штатного топливного насоса высокого давления (ТНВД) НК-12 с грибковыми клапанами, сливной форсунки закрытого типа, имеющей предварительную затяжку пружины на давление начала впрыска 21 МПа. Одно из сопловых отверстий распылителя $8 \times 0,3 \times 140^\circ$ ориентировано по оси гнезда клапана воздухопуска.

номерного вращения КВ с частотами, обеспечивающими скорости движения плунжера топливного насоса и поршня вблизи положения ВМТ реального многоцилиндрового дизеля при холодном пуске, возможно получение информации о процессах топливоподдачи, смесеобразования, воспламенения и сгорания горючей смеси в форме, удобной для математической обработки. В связи с этим экспериментальные исследования рабочего процесса желательно проводить на одноцилиндровом дизеле (ОЦД) на стационарных режимах вращения КВ в диапазоне частот от 40 до 100 мин⁻¹. При этом геометрическая степень сжатия (ϵ_r) должна быть такой, чтобы температура конца сжатия (T_c), которая, как известно, в основном определяет процесс предпламенной подготовки топлива и воспламенение топливно-воздушной смеси, соответствовала T_c полноразмерного дизеля.

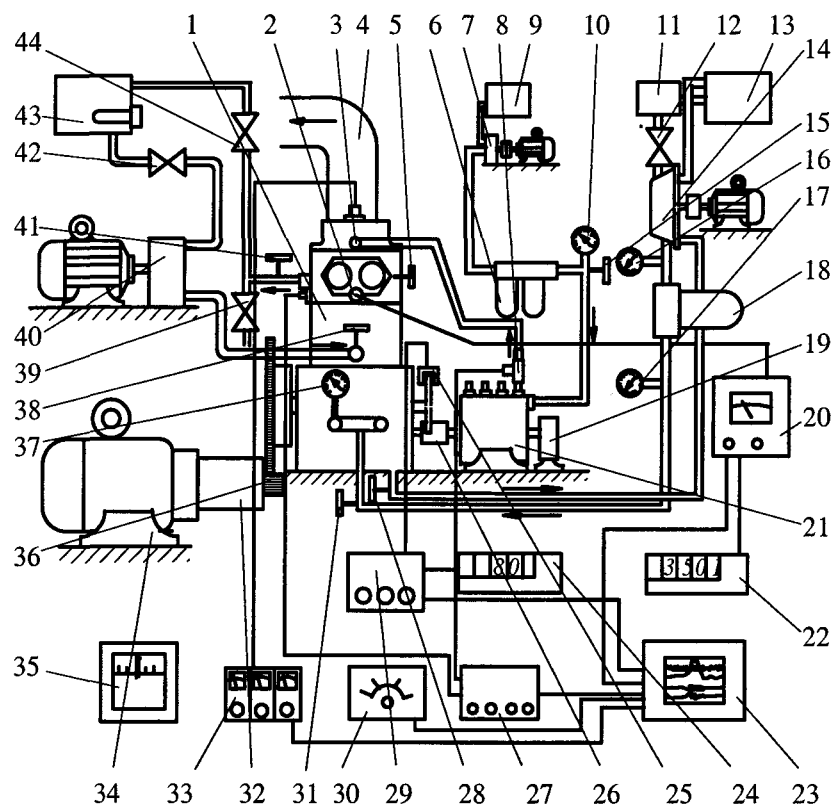


Рис. 2. Схема стенда для исследования рабочего процесса транспортного дизеля на пусковых режимах: 1 – одноцилиндровый дизель; 2 – электроразрядное устройство; 3 – форсунка; 4 – выпускной трубопровод; 5, 15, 28, 31, 38, 41 – термопары ХК; 6 – топливный фильтр; 7 – топливный подкачивающий насос; 8 – датчик давления RD-500; 9 – топливный бак; 10, 16, 17, 37 – манометры; 11 – теплообменник; 12, 39, 42, 44 – краны; 13 – масляный бак; 14 – масляный насос; 18 – масляный фильтр МАФ; 19 – контакт сигнала синхронизации; 20 – электронный блок разрядного устройства; 21 – ТНВД; 22 – счетчик количества разрядов; 23 – осциллограф Н-117; 24 – частотомер; 25 – датчик угловой отметки; 26 – муфта изменения угла впрыска топлива; 27 – электрометрический усилитель; 29 – усилитель угловой отметки; 30 – отметчик времени П-104; 32 – стартерный механизм; 33 – тензостанция УТС-1-12В; 34 – электродвигатель; 35 – потенциометр ЭПП-09; 36 – зубчатое соединение; 40 – жидкостный насос; 43 – водяной бак

Измерительный комплекс обеспечивает регистрацию на светолучевом осциллографе Н-117, поз. 23, следующих параметров: подъем иглы форсунки, давление топлива в трубопроводе высокого давления, давление перед распыливающими отверстиями форсунки, давление рабочего тела в цилиндре дизеля, напряжение на электроразрядном устройстве и ток электрического разряда, момент фоторегистрации, отметки интервалов времени через 0,1 с, положение коленчатого вала, соответствующее ВМТ, угловые отметки через 5 и 30 град п.к.в.

На электронном двухлучевом запоминающем осциллографе С8-17 регистрируются с последующим фотографированием основные параметры работы электроразрядной системы: ток электрического разряда накопительного конденсатора, напряжение на силовом тиристоре, напряжение на накопительном конденсаторе и напряжение на электроразрядном устройстве. Кроме того, обеспечена регистрация частоты вращения КВ по электронному частотомеру 24 типа Ф5041 и температурного состояния дизеля и окружающей среды потенциометром 35 типа ЭПП-09 при помощи хромель-копелевых (ХК) термопар. В качестве датчика подъема иглы форсунки применен специально разработанный универсальный индуктивный дифференциальный датчик, установленный в корпус форсунки 3. Сигнал от датчика усиливается тензостанцией 33 типа УТС-1-12В. Конструкция датчика представлена на рис. 3.

Регистрация всех перечисленных выше давлений производится с помощью пьезокварцевых датчиков давления типа PD-500 и PD-100 производства фирмы RFT и четырехканального электрометрического усилителя 27 (см. рис. 2), изготовленного по схеме, разработанной в СКБ «Тур-

Контроль и испытания

бина». Фиксирование отметки ВМТ производится с помощью индукционного датчика ИДО-1Ф, изготовленного в ГСКБ «Трансдизель» ПО ЧТЗ. В качестве датчиков угловой отметки и частоты вращения коленчатого вала дизеля применяются фотодиоды ФД-1, освещаемые лампочкой накаливания через пазы в диске, укрепленном на носке коленчатого вала дизеля.

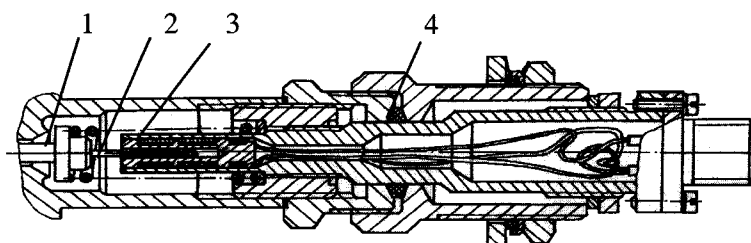


Рис. 3. Датчик перемещения иглы распылителя форсунки: 1 – штанга форсунки; 2 – сердечник с ферромагнитным накопчиком; 3 – индуктивная обмотка; 4 – уплотнение для варианта бессливной форсунки

Для исследования рабочего процесса ОЦД при плазменно-факельном зажигании с минимальными затратами энергии стенд оснащен оригинальной электроразрядной системой подготовки и воспламенения топлива. При работе системы в камере сгорания в заданный момент времени электроразрядом выделяется энергия в виде плазменного факела, которая обеспечивает надежное воспламенение и интенсивное сгорание топлива в условиях низкого качества смесеобразования. Момент электроразряда определяется срабатыванием контакта 19, установленного на боковой поверхности топливного насоса 21.

Применение в качестве контакта автомобильного кулачкового прерывателя не обеспечило необходимую точность установки момента разряда (погрешность установки составляла более 1...3 град п.к.в.). Поэтому для достижения более высокой точности установки и прецизионной регулировки момента разряда разработан и изготовлен на базе фотодиода ФД-1 электронный синхроконтакт, по принципу работы аналогичный датчику угловой отметки (рис. 4). Изменение момента электроразряда обеспечивается поворотом кронштейна 8 с закрепленными на нем лампочкой и фотодиодом вокруг оси кулачкового вала рычагом 7. Величина угла поворота контролируется по шкале 3.

Для сохранения по ходу эксперимента теплового состояния ОЦД на каждом стационарном режиме в один прием обрабатывается всего несколько циклов. Поэтому величины частоты вращения КВ и цикловой подачи топлива регулируются заранее. При этом средняя величина цикловой подачи топлива определяется объемным методом за серию из 20...50 впрысков. Регистрация 3...5 рабочих процессов производится при одновременном включении подачи топлива, электронного блока электроразрядного устройства и осциллографа Н-117. Между экспериментами выдерживаются паузы по 10...15 мин для выравнивания температуры деталей дизеля.

Экспериментальный стенд позволяет осуществлять исследования рабочего процесса холодного запуска дизеля, который производится с применением факельных подогревателей. Моделирование условий подогрева впускного воздуха в факельных подогревателях при неполном сгорании дизельного топлива и потреблении для этого кислорода воздуха осуществляется при помощи паяльной лампы

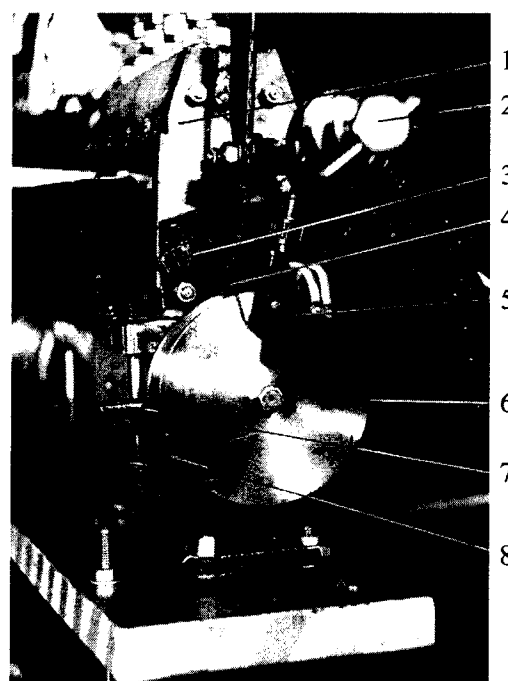


Рис. 4. Установка электронного синхроконтакта: 1 – ТНВД; 2 – упор рейки ТНВД; 3 – шкала; 4 – стрелка; 5 – синхроконтакт; 6 – диск с прорезью; 7 – рычаг регулировки момента разряда; 8 – кронштейн

с одновременным дополнительным впрыском распыленного дизельного топлива в серийный впускной коллектор через распыливающее отверстие диаметром $0,3 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 5).

Регулировка подачи топлива опытной форсункой 9 осуществляется независимо от положения рейки топливного насоса отдельным рычагом. При определенных фиксированных его положениях устанавливается требуемая величина цикловой подачи от 0 до $0,21 \cdot 10^{-3}$ кг. Впрыск топлива опытной форсункой начинается в ходе такта всасывания в момент времени, соответствующий 44 град п.к.в. после ВМТ. Неполнота выгорания топлива в факельном подогревателе моделируется дополнительным впрыском топлива в свежий заряд форсункой 9.

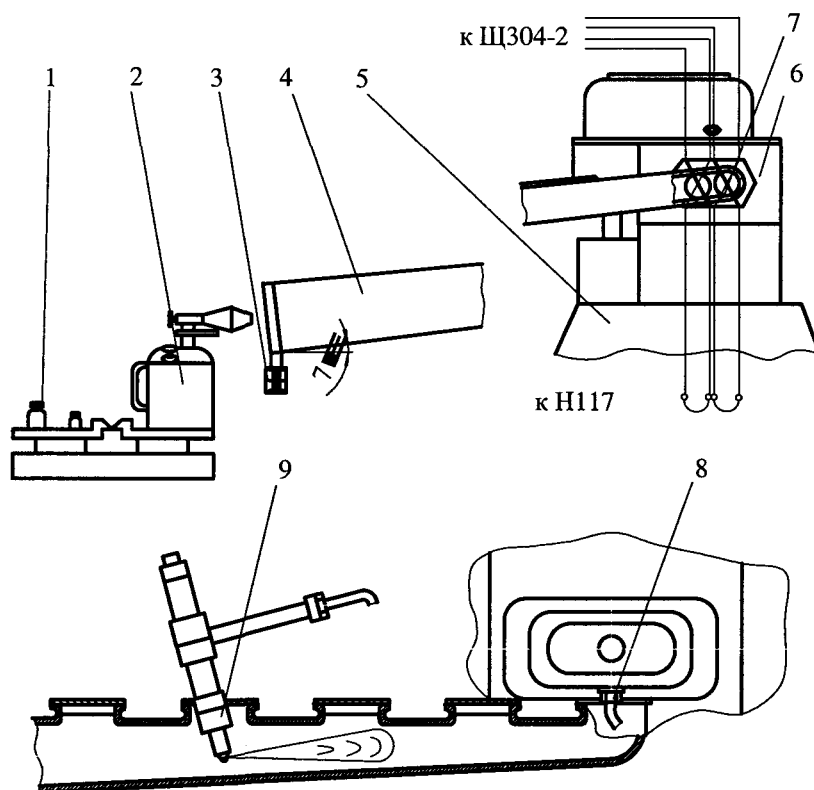


Рис. 5. Установка впускного коллектора на ОЦД 1415/16: 1 – весы; 2 – паяльная лампа; 3 – мерная емкость; 4 – впускной коллектор; 5 – картер дизеля; 6 – головка цилиндра; 7 – термопара ХК; 8 – штатная форсунка дизеля; 9 – опытная форсунка

Для моделирования рабочего процесса в цилиндре, наиболее удаленном от факельного подогревателя и имеющем наихудшие условия для самовоспламенения топлива, впускной коллектор 4 укрепляется первым окном к головке цилиндра 6 с уклоном, что обеспечивает сток и сбор в мерную емкость 3 топлива, впрыснутого опытной форсункой 9 и не попавшего в цилиндр дизеля. Степень подогрева свежего заряда регулируется и контролируется весовым расходом бензина в паяльной лампе 2, которая устанавливается на весах 1 перед впускным коллектором таким образом, чтобы пламя находилось во входной его части. Температура свежего заряда на входе в цилиндр контролируется электронным милливольтметром типа Щ304-2 и фиксируется на осциллографе Н-117 с помощью термопар 7 группы ХК (диаметр проволоки $0,2 \cdot 10^{-3}$ м). Там же записывается осциллограмма давления в трубопроводе высокого давления опытной форсунки. Эксперименты необходимо проводить только после стабилизации горения топлива в паяльной лампе.

Перед исследованием запуска одноцилиндрового дизеля шестерня стартерного механизма вводится в зацепление при положении поршня в начале такта расширения. Рейка ТНВД устанавливается в заданное положение. Затем одновременно включается съемка на осциллограф Н-117, питание электропривода и электронного блока. За время прохождения тактов расширения, впуска и сжатия свежего заряда частота вращения КВ ОЦД увеличивается и в конце такта сжатия достигает заданного уровня. На такте расширения шестерня стартерного механизма выходит из зацепления, выключается питание электродвигателя, и дизель может самостоятельно разогнаться до

Контроль и испытания

800...900 мин⁻¹. Если требуется исключить его прогрев на холостом ходу, подача топлива и питание электронного блока сразу выключаются.

Разработанный и изготовленный оригинальный стенд ОЦД с системой факельного подогрева и электроразрядной системой подготовки и воспламенения топлива позволяет исследовать рабочий процесс на пусковых режимах: при низких стационарных частотах вращения КВ и при разгоне. Для проведения экспериментальных исследований процесса сгорания при воспламенении от сжатия и при плазменно-факельном зажигании разработаны методики моделирования холодного запуска полноразмерного транспортного дизеля на ОЦД.

Представленная работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. Камалтдинов, В.Г. *Схема рабочего процесса при холодном пуске дизеля* / В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелиович // *Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: Научный вестник ЧВВАКИУ*. – Челябинск, 2004. – Вып. 17. – С. 33–36.

Поступила в редакцию 25 января 2011 г.

Камалтдинов Вячеслав Гилимянович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Двигателей внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – процессы смесеобразования, воспламенения и сгорания в дизелях. Тел.: 89517770011, e-mail: vkamaltdinov@yandex.ru

Vyacheslav G. Kamaltdinov. The candidate of engineering science, docent of Internal Combustion Engine department of South Ural State University. The area of scientific – diesel engine fuel-air mixing, inflammation, and combustion processes. Tel.: 89517770011, e-mail: vkamaltdinov@yandex.ru

Никифоров Сергей Степанович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобилей», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – процессы смесеобразования, воспламенения и сгорания в дизелях. Тел.: 89049405380, e-mail: nss@susu.ac.ru

Sergey S. Nikiforov. The candidate of engineering science, docent of Automotive department of South Ural State University. The area of scientific – diesel engine fuel-air mixing, inflammation, and combustion processes. Tel.: 89049405380, e-mail: nss@susu.ac.ru