

РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

ADJUSTMENT CHARACTERISTICS OF THE DIESEL ENGINE OPERATING ON NATURAL GAS

В.А. ЛИХАНОВ, д.т.н.
А.В. ГРЕБНЕВ, к.т.н.
М.Л. СКРЯБИН, к.т.н.
А.Е. ТОРОПОВ, к.т.н.

Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Киров, Россия, lv99@mail.ru

V.A. LIKHANOV, DSc in Engineering
A.V. GREBNEV, PhD in Engineering
M.L. SKRYABIN, PhD in Engineering
A.E. TOROPOV, PhD in Engineering

Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia, lv99@mail.ru

В статье представлены регулировочные характеристики дизеля по углу опережения впрыскивания топлива при работе по газодизельному процессу. В настоящее время для многих товаропроизводителей актуальна задача снижения издержек производства. В сельском хозяйстве существенную статью издержек составляют затраты на топливо для мобильных энергетических средств. Одним из путей снижения этих затрат является использование альтернативных, более дешевых видов топлива. Одним из таких топлив является природный газ. Самым распространенным типом двигателя в сельском хозяйстве является дизель. Несмотря на большое количество проведенных работ по переводу дизелей на природный газ до сих пор остается недостаточно изученным вопрос перевода высокофорсированных дизелей малой размерности. В качестве объекта исследований был выбран дизель Д-245.7 (4СН11/12,5). Цель исследования – перевод дизеля на газодизельный процесс. Одним из этапов исследования было проведение стендовых испытаний со снятием регулировочных характеристик по углу опережения впрыскивания топлива. В результате стендовых испытаний определены показатели процесса сгорания, характеристики тепловыделения, эффективные показатели дизеля при различных углах опережения впрыскивания топлива при работе по дизельному и газодизельному процессам. Основные выводы следующие: 1) при работе дизеля по газодизельному процессу наблюдается повышение температуры, давления, скорости нарастания давления в цилиндре; 2) мощностные показатели дизеля при работе по газодизельному процессу полностью сохраняются; 3) при переводе дизеля на природный газ в качестве одной из рекомендаций необходимо назвать снижение угла опережения впрыскивания топлива.

Ключевые слова: газодизель, природный газ, альтернативное топливо.

The article presents adjustment characteristics of the diesel engine in terms of the fuel injection advance angle during gas-diesel process operation. Currently the problem of reducing production costs is relevant for many producers. In the agricultural industry a considerable cost item consist of fuel costs for mobile energy vehicle. One way to reduce these costs is using of alternative cheaper fuel types. The natural gas is one of such fuels. The most common type of engine in agriculture is a diesel. In spite of the large number of conducted works to convert diesel engines to natural gas, the question of conversion high-powered low-dimension diesel engines has not been sufficiently investigated. As an object of research D-245.7 (4СН11/12,5) was chosen. The conversion of diesel engine to gas-diesel process is the purpose of an investigation. One of the stages of the research was conducting bench tests with taking adjustment characteristics of the fuel injection advance angle. As a result of bench tests the parameters of combustion process, characteristics of heat emission, effective indicators of the diesel engine at various values of the fuel injection advance angle during work on diesel and gas-diesel processes are determined. The main following conclusions are: 1) during the diesel engine's operation on the gas-diesel process an increase of temperature, pressure, the rate of pressure rise in cylinder are observed; 2) the power parameters of diesel engine during the work on gas-diesel process are completely preserved; 3) under such conversion the diesel engine to natural gas one of recommendations is a reduction of the fuel injection advance angle.

Keywords: gas-diesel engine, natural gas, alternative fuel.

Введение

Одной из ключевых задач любого товаропроизводителя в настоящее время является снижение себестоимости продукции. Значительную долю себестоимости у сельскохозяйственных производителей составляют затраты на топливо для автотракторного парка. Затраты на топливо можно снизить путем выбора более дешевого, альтернативного топлива.

К числу перспективных альтернативных топлив относится природный газ. Его привлекательность неоспорима. Природный газ обладает очень низкой стоимостью (менее 50 % стоимости бензина или дизельного топлива). Данным видом природного ресурса очень богата Россия, трубопроводная сеть природного газа распространена повсеместно. Небольшие сложности возникают только с заправкой и хранением природного газа на автотракторном средстве, но с ними вполне можно мириться.

В сельском хозяйстве наиболее распространены мобильные средства с дизелями в качестве источника энергии. Несмотря на большое количество проведенных работ по переводу дизелей на природный газ до сих пор остается недостаточно изученным вопрос перевода высокофорсированных дизелей малой размерности [1].

При конвертации дизеля для работы на природном газе (ПГ) необходимо решить несколько вопросов. Прежде всего нужно отметить, что на одном ПГ дизель без конструктивных изменений работать не может. Принцип работы дизеля заключается в том, что в цилиндр впрыскивается топливо, самовоспламеняющееся от находящегося там воздуха, нагретого до высокой температуры (400...500 °С) в результате сжатия. Дизельное топливо (ДТ) самовоспламеняется при 230 °С, а ПГ – при 650 °С, т.е. температура воздуха, сжатого в цилиндре дизеля, недостаточна для самовоспламенения ПГ. Тем не менее, существуют два способа перевода дизельного двигателя на ПГ – переделка дизеля в газовый двигатель и в газодизель.

Переделка в газодизель более привлекательна. При данном способе перевода нет необходимости вносить существенные изменения в конструкцию дизеля. Таким способом можно модернизировать уже находящиеся в эксплуатации дизели.

Цель исследования

Целью исследования является разработка рекомендаций по модернизации уже находящегося

в эксплуатации дизеля с целью преобразования его в газодизель.

Методы исследования

На кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятской ГСХА проведены исследования по переводу дизеля на ПГ. Объектом исследований выбран дизель Д-245.7 (размерность 4ЧН11/12,5) с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха. Данный дизель широко распространен в сельском хозяйстве. При реализации газодизельного процесса на данном дизеле ПГ подается во впускной трубопровод перед турбокомпрессором через газовый смеситель-дозатор, запальная порция ДТ подается через штатную топливную систему [2].

Экспериментальная установка включала в себя электротормозной стенд SAK-N 670, измерительную аппаратуру для снятия эффективных показателей (рис. 1). Для индицирования процесса сгорания использовался индикатор МАИ5А, датчик давления которого устанавливался на головке блока цилиндров и соединялся каналом с камерой сгорания первого цилиндра.

Результаты и обсуждение

В соответствии с методикой исследований [3] одним из этапов было снятие регулировочных характеристик. Одним из параметров, подлежащих оптимизации, был угол опережения впрыскивания запального дизельного топлива. При снятии регулировочных характеристик были определены эффективные показатели дизеля, показатели процесса сгорания, характеристики тепловыделения.

• Эффективные показатели

На рис. 2 представлены графики мощностных и экономических показателей дизеля при



Рис. 1. Общий вид установки

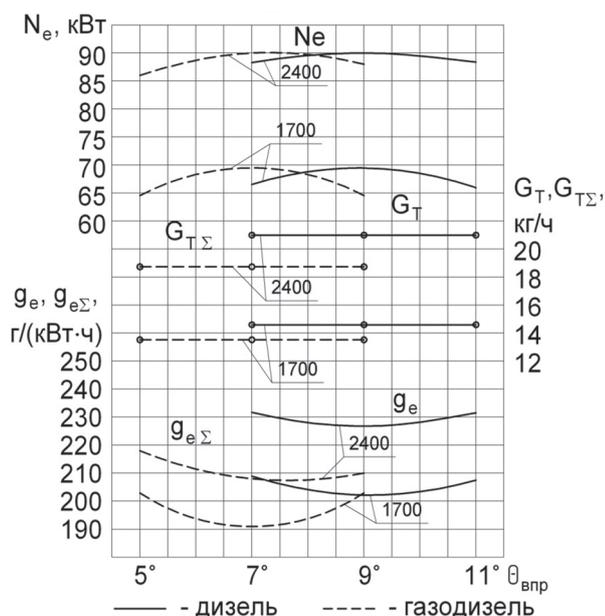


Рис. 2. Эффективные показатели дизеля:
 ————— дизельный процесс;
 - - - - газодизельный процесс

разных углах опережения впрыскивания топлива при работе на ДТ и ПГ на частотах вращения коленчатого вала 2400 мин⁻¹ (номинальный скоростной режим) и 1700 мин⁻¹ (режим максимального крутящего момента). На рисунке обозначены: N_e – эффективная мощность, G_T , g_e – часовой и удельный расход топлива на дизельном процессе, $G_{T\Sigma}$, $g_{e\Sigma}$ – часовой и удельный суммарный расход ДТ и ПГ на газодизельном процессе, $\Theta_{впр}$ – угол опережения впрыскивания дизельного топлива.

Для построения данной регулировочной характеристики были сняты и обработаны несколько нагрузочных характеристик на различных углах опережения впрыскивания топлива (УОВТ). При этом из нагрузочных характеристик взяты точки N_e , g_e и $g_{e\Sigma}$ с одинаковыми значениями часового расхода топлива G_T [4]. Регулировочная характеристика строилась для определения оптимального УОВТ исходя из достижения минимальной величины удельного расхода топлива.

Анализируя графики дизельного процесса на номинальной частоте вращения коленчатого вала ($n = 2400$ мин⁻¹), можно сделать вывод, что максимальная мощность $N_e = 90,0$ кВт при постоянном значении часового расхода ДТ $G_T = 21$ кг/ч достигается при угле опережения впрыскивания дизельного топлива $\Theta_{впр д} = 9^\circ$. При этом значение удельного расхода ДТ составляет $g_e = 227$ г/кВт·ч.

При установке более позднего УОВТ $\Theta_{впр д} = 7^\circ$ происходит снижение эффективной мощности до значения $N_e = 88,3$ кВт и увеличение удельного расхода ДТ до $g_e = 232$ г/кВт·ч. При установке более раннего УОВТ $\Theta_{впр д} = 11^\circ$ эффективная мощность также снижается до значения $N_e = 88,3$ кВт, а удельный расход ДТ увеличивается до $g_e = 232$ г/кВт·ч.

Анализируя графики газодизельного процесса на номинальной частоте вращения коленчатого вала, можно сказать, что максимальная мощность $N_e = 90,0$ кВт при постоянном суммарном часовом расходе ДТ и ПГ $G_{T\Sigma} = 18,8$ кг/ч достигается при установке угла опережения впрыскивания запального дизельного топлива $\Theta_{впр гд} = 7^\circ$. Значение удельного суммарного расхода топлива в этом случае составляет $g_{e\Sigma} = 208$ г/кВт·ч. При установке более позднего УОВТ $\Theta_{впр гд} = 5^\circ$ происходит снижение эффективной мощности до значения $N_e = 86,0$ кВт и увеличение удельного расхода до $g_{e\Sigma} = 218$ г/кВт·ч. При установке более раннего УОВТ $\Theta_{впр гд} = 9^\circ$ эффективная мощность снижается до значения $N_e = 88,0$ кВт, а удельный расход увеличивается до $g_{e\Sigma} = 210$ г/кВт·ч. Снижение величин часового и удельного расхода топлива на газодизельном процессе по сравнению с дизельным процессом объясняется большей теплотой сгорания единицы массы ПГ.

Если рассматривать графики работы дизеля на режиме максимального крутящего момента ($n = 1700$ мин⁻¹), то можно видеть, что, как и для номинальной частоты вращения, максимальная мощность и минимальный удельный расход достигается на дизельном процессе при УОВТ $\Theta_{впр д} = 9^\circ$, на газодизельном процессе – при УОВТ $\Theta_{впр гд} = 7^\circ$.

Таким образом, анализируя изменение эффективных показателей при разных УОВТ, можно отметить, что если исходить из условия достижения минимального удельного расхода топлива g_e , то при работе на дизельном процессе на всех скоростных режимах оптимальным будет УОВТ $\Theta_{впр д} = 9^\circ$, а при работе на газодизельном процессе – $\Theta_{впр гд} = 7^\circ$. Здесь также нужно отметить, что изменение УОВТ достаточно сильно сказывается на работе дизеля. При работе на ранних УОВТ значительно увеличивается «жесткость» работы дизеля, что сопровождается стуками в цилиндро-поршневой группе. При работе на поздних УОВТ происходит быстрое повышение температуры охлаждающей жидкости, что может привести к перегреву дизеля.

• Показатели процесса сгорания

При переводе дизеля на ПГ было также проведено индицирование и были получены индикаторные диаграммы при разных УОВТ [5].

На рис. 3, а представлены совмещенные индикаторные диаграммы дизельного процесса при УОВТ $\Theta_{\text{впр д}} = 7^\circ, 9^\circ, 11^\circ$ при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и среднем эффективном давлении $p_e = 0,947 \text{ МПа}$. Как видно из графиков, при более позднем впрыскивании ДТ падает максимальное давление цикла $p_{z \text{ max}}$, и весь процесс сгорания сдвигается на линию расширения. Если при оптимальном значении установочного УОВТ ($\Theta_{\text{впр д}} = 9^\circ$) максимальное значение давления газов равно $p_{z \text{ max}} = 13,8 \text{ МПа}$ и достигается при угле $\varphi_z = 6,5^\circ$ поворота коленчатого вала (п.к.в.) после верхней мертвой точки (ВМТ), то при большем значении $\Theta_{\text{впр д}} = 11^\circ$ давление газов в цилиндре возрастает до $p_{z \text{ max}} = 14,0 \text{ МПа}$ и достигается при угле $\varphi_z = 6,3^\circ$ п.к.в. после ВМТ. При меньшем значении $\Theta_{\text{впр д}} = 7^\circ$ давление газов в цилиндре понижается до $p_{z \text{ max}} = 13,0 \text{ МПа}$ и достигается при угле $\varphi_z = 8,2^\circ$ п.к.в. после ВМТ. Точки, соответствующие началу видимого сгорания на индикаторных диаграммах, снятых для углов опережения впрыскивания ДТ $\Theta_{\text{впр д}} = 7^\circ, 9^\circ, 11^\circ$, лежат на линии сжатия при значениях углов $\varphi_c = 1,0^\circ$ п.к.в. после ВМТ и $\varphi_c = 0^\circ, 1,5^\circ$ п.к.в. до ВМТ, соответственно. Период задержки воспламенения соответственно составляет $\varphi_i = 8,0^\circ, 9,0^\circ, 9,5^\circ$.

На рис. 3, б представлены совмещенные индикаторные диаграммы газодизельного процесса при углах опережения впрыскивания запального ДТ $\Theta_{\text{впр гд}} = 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ$ при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ и среднем эффективном давлении $p_e = 0,947 \text{ МПа}$. Как и при работе дизеля на ДТ, при более позднем впрыскивании снижается максимальное давление цикла $p_{z \text{ max}}$. Особенностью индикаторных диаграмм при УОВТ $\Theta_{\text{впр гд}} = 5^\circ$ и 7° является наличие после ВМТ небольшого участка до точки, соответствующей максимальному давлению сгорания $p_{z \text{ max}}$, где текущее значение индикаторного давления уменьшается.

Таким образом, характер изменения давления газов на индикаторных диаграммах при переходе с дизельного на газодизельный процесс сохраняется. Во всех случаях увеличения УОВТ повышается значение максимального давления сгорания $p_{z \text{ max}}$, и точка его достижения смещается по индикаторной диаграмме влево, ближе к ВМТ.

На дизельном процессе при ранних УОВТ из-за низкой температуры, давления, малой турбулентности в цилиндре происходит задержка самовоспламенения запального дизельного топлива. При этом увеличивается время прогрева, испарения капель. Образование начальных радикалов химических реакций происходит медленно. Период задержки воспламенения увеличивается, что в условиях всё продолжающегося впры-

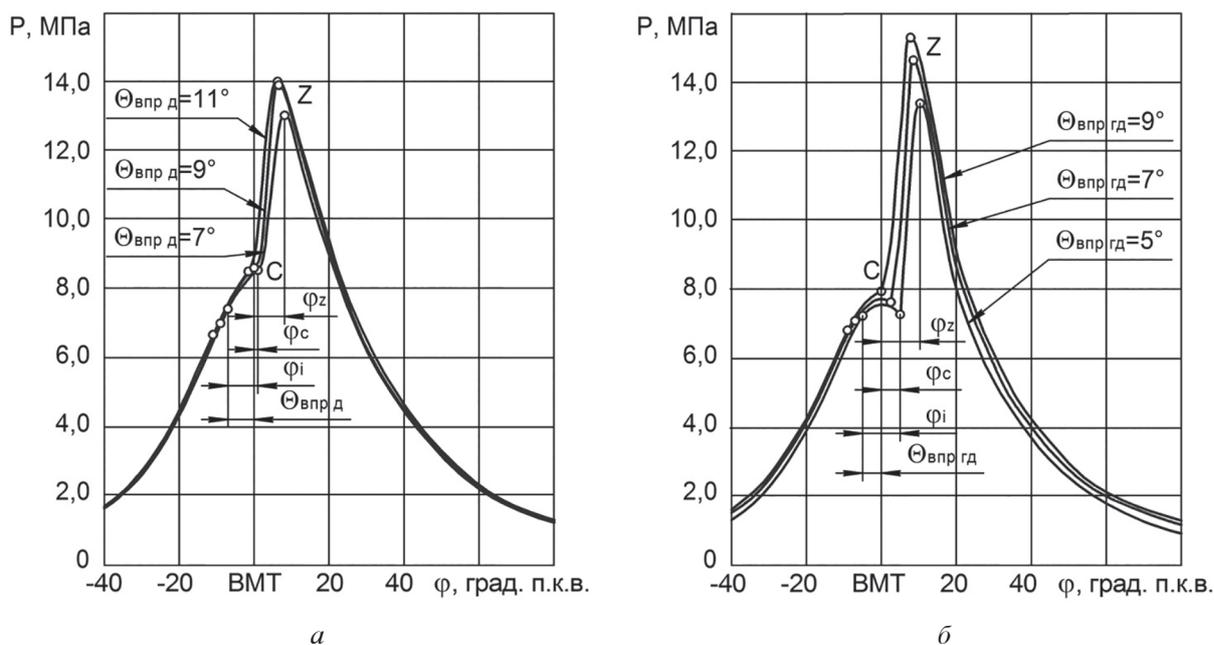


Рис. 3. Совмещенные индикаторные диаграммы при различных УОВТ при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,947 \text{ МПа}$: а – дизельный процесс; б – газодизельный процесс

сбивания приводит к накоплению в цилиндре большого количества топлива. После достижения в цилиндре критической температуры происходит самовоспламенение, все топливо резко начинает сгорать. Скорость нарастания давления значительно повышается, большая доля топлива сгорает до ВМТ. Это приводит к повышению максимального давления цикла $p_{z \max}$, точка достижения максимального давления смещается влево, ближе к ВМТ, работа сжатия увеличивается, работа расширения уменьшается. Индикаторные показатели рабочего процесса ухудшаются, возрастают нагрузки на цилиндропоршневую группу.

При работе по дизельному процессу на поздних УОВТ топливо впрыскивается в воздушный заряд, характеризующийся высокими значениями давления и температуры. В таких условиях происходит увеличение скорости предпламенных реакций, при этом уменьшается период задержки воспламенения. Однако момент начала видимого горения вследствие позднего впрыскивания смещается по индикаторной диаграмме вправо. Большая часть топлива сгорает после прохождения поршнем ВМТ, что приводит к уменьшению максимального давления цикла $p_{z \max}$. Большая доля выделившейся при горении теплоты отдается в стенки цилиндра на бесполезный нагрев системы охлаждения. Полезная работа цикла уменьшается, расход топлива возрастает.

На газодизельном процессе механизм воспламенения топлива имеет несколько особенностей. Метано-воздушная смесь (МВС), находящаяся в цилиндре дизеля, не может никаким образом самовоспламениться из-за слишком низкой температуры в конце сжатия. Для её воспламенения используется небольшая запальная порция ДТ. В цилиндре дизеля, при данных условиях, ДТ хорошо самовоспламеняется и становится мощным источником воспламенения МВС. Таким образом, на воспламенение МВС в большей степени влияет наличие горящего факела ДТ, а не температура и давление в цилиндре. Так как воспламенение МВС связано с самовоспламенением запальной порции ДТ, то можно заключить, что основные закономерности изменения индикаторной диаграммы на газодизельном процессе аналогичны дизельному.

На рис. 4 представлены графики показателей процесса сгорания при различных УОВТ на режиме номинальной мощности.

Сравнивая графики дизельного (работа на ДТ) и газодизельного процессов (работа на ПГ),

можно отметить, что значения показателей процесса сгорания при работе на ПГ увеличиваются, по сравнению с работой на ДТ. Максимальная осреднённая температура газов в цилиндре T_{\max} при работе на ПГ существенно больше, чем при работе на ДТ. При УОВТ $\Theta_{\text{впр}} = 7^\circ$ при переходе на ПГ температура T_{\max} увеличивается с 1940 до 2350 К, при $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$ температура T_{\max} увеличивается с 2020 до 2420 К. Максимальное давление сгорания $p_{z \max}$ при работе на ПГ больше. При $\Theta_{\text{впр}} = 7^\circ$ давление $p_{z \max}$ увеличивается с 13,0 до 14,6 МПа, при $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$ давление $p_{z \max}$ увеличивается с 13,8 до 15,4 МПа. При $\Theta_{\text{впр}} = 7^\circ$ степень повышения давления λ при переходе на ПГ увеличивается с 1,55 до 1,85, при $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$ значение λ увеличивается с 1,60 до 1,92. Значение скорости нарастания давления $(dp/dj)_{\max}$ при работе на ПГ значительно больше, чем при работе на ДТ. При $\Theta_{\text{впр}} = 7^\circ$ при переходе с ДТ на ПГ значение $(dp/dj)_{\max}$ увеличивается с 0,68 до 0,93 МПа/град, при $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$ значение $(dp/dj)_{\max}$ увеличивается с 0,78 до 1,08 МПа/град. Величина угла задержки воспламенения ϕ_i при $\Theta_{\text{впр}} = 7^\circ$ увеличивается с $8,0^\circ$ поворота коленчатого вала (п.к.в.) до $9,5^\circ$ п.к.в. При $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$ углы ϕ_i при работе дизеля на ПГ и на ДТ равны и составляют $\phi_i = 9,0^\circ$ п.к.в.

Повышение давления, температуры газов в цилиндре на газодизельном процессе объ-

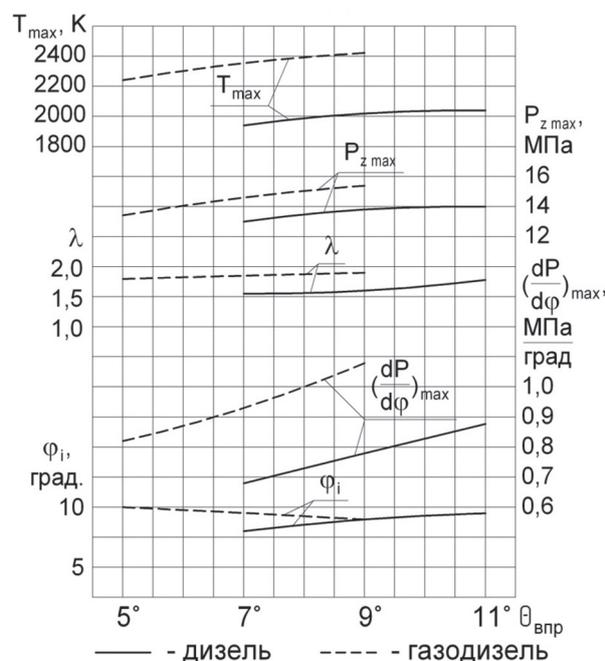


Рис. 4. Показатели процесса сгорания при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, $p_c = 0,947 \text{ МПа}$:

— — дизельный процесс;
 - - - газодизельный процесс

ясняется более быстрым горением природного газа. Превалирует объемный механизм воспламенения.

На рис. 5 представлены графики характеристик тепловыделения при различных УОВТ на режиме номинальной мощности.

Сравнивая работу дизеля на ДТ и на ПГ, можно отметить, что значения характеристик тепловыделения при работе на ПГ увеличиваются, по сравнению с работой на ДТ. Угол поворота коленчатого вала, соответствующий достижению в цилиндре максимальной температуры $\varphi_{T_{\max}}$ при работе на ПГ больше, чем при работе на ДТ. При УОВТ $\Theta_{\text{впр}} = 7^\circ$ при переходе с ДТ на ПГ значение $\varphi_{T_{\max}}$ увеличивается с $9,5^\circ$ п.к.в. после ВМТ до $10,5^\circ$ п.к.в. после ВМТ, при УОВТ $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$ значение $\varphi_{T_{\max}}$ увеличивается с $8,0^\circ$ п.к.в. после ВМТ до $9,5^\circ$ п.к.в. после ВМТ. Величина активного тепловыделения для мо-

мента достижения в цилиндре максимального давления $\chi_{i Pz \max}$ при работе на ПГ больше. При $\Theta_{\text{впр}} = 7^\circ$ значение $\chi_{i Pz \max}$ увеличивается с 0,59 до 0,71, при $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$ значение $\chi_{i Pz \max}$ увеличивается с 0,63 до 0,76. Значение активного тепловыделения для момента достижения в цилиндре максимальной температуры $\chi_{i T_{\max}}$ при работе на ПГ больше. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 7^\circ$ значение $\chi_{i T_{\max}}$ увеличивается с 0,66 до 0,80, при $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$ значение $\chi_{i T_{\max}}$ увеличивается с 0,70 до 0,82. Величина скорости относительного тепловыделения $(d\chi/d\varphi)_{\max}$ при работе на ПГ также больше, чем при работе на ДТ. При $\Theta_{\text{впр}} = 7^\circ$ значение $(d\chi/d\varphi)_{\max}$ увеличивается с 0,14 до 0,155, при $\Theta_{\text{впр}} = 9^\circ$ значение $(d\chi/d\varphi)_{\max}$ увеличивается с 0,15 до 0,165.

Анализируя значения показателей, можно сказать, что на газодизельном процессе большая часть топлива расходуется в начальные фазы сгорания, до момента достижения в цилиндре максимальных значений давления и температуры.

В результате исследований, исходя из всех условий, окончательно были выбраны следующие оптимальные углы опережения впрыскивания топлива: для дизельного процесса $\Theta_{\text{впр д}} = 9^\circ$, для газодизельного процесса $\Theta_{\text{впр гд}} = 7^\circ$. Показатели работы для обоих процессов представлены в сравнении в табл. 1.

Выводы

Из представленного материала можно сделать следующие выводы.

1. При работе дизеля по газодизельному процессу показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения изменяются по сравнению с дизельным процессом. В частности, возрастают максимальное давление, максимальная температура, скорость нарастания давления процесса сгорания. Значения показателей при этом не выходят за допустимые границы, рекомендованные заводом-изготовителем дизеля.

2. Мощностные параметры на газодизельном процессе сохраняются на уровне дизельного процесса.

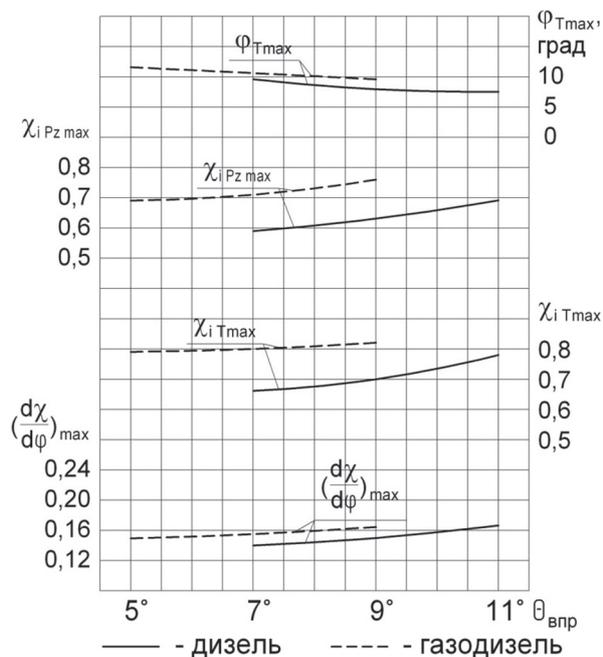


Рис. 5. Характеристики тепловыделения при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,947 \text{ МПа}$:
 — — — — дизельный процесс;
 - - - - газодизельный процесс

Показатели работы дизеля Д-245.7 при оптимальных углах опережения впрыскивания топлива (на номинальной нагрузке)

Рабочий процесс	Показатели							
	$\Theta_{\text{впр}}$	N_e , кВт	$G_T, G_{T\Sigma}$, кг/ч	$g_{e^*}, g_{e^*\Sigma}$, г/кВт·ч	$p_{z \max}$, МПа	T_{\max} , К	$(dp/d\varphi)_{\max}$	
Дизельный	9°	90,0	21	227	13,8	2020	0,78	
Газодизельный	7°	90,0	18,8	208	14,6	2350	0,93	

Таблица 1

3. При работе на газодизельном процессе для достижения минимальной экономичности и снижения «жесткости» процесса сгорания необходимо уменьшить угол опережения впрыскивания дизельного топлива.

Литература

1. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Улучшение эксплуатационных показателей дизеля с турбонаддувом // Строительные и дорожные машины. 2016. № 12. С. 13–19.
2. Гребнев А.В. Перевод дизеля Д-245.7 на природный газ // Инновационные процессы и технологии в современном сельском хозяйстве: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Благовещенск, 2–4 декабря 2014 г.). В 2 ч. Ч. 2. Благовещенск: ДальГАУ, 2014. С. 270–273.
3. Гребнев А.В. Улучшение эффективных показателей дизеля с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе путем совершенствования процессов сгорания и тепловыделения: дис. ... канд. техн. наук. Киров, 2009. 211 с.
4. Гребнев А.В., Скрябин М.Л. Влияние применения природного газа на процесс сгорания дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха // Общество, наука, инновации (НПК – 2015): всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. материалов: общеуниверситет. секция, БФ, ХФ, ФСА, ФАМ, ЭТФ, ФАВТ, ФПМТ, ФЭМ, ФГСН, ЮФ, 13–24 апреля 2015 г. Вят. гос. ун-т. Киров, 2015. С. 948–952.
5. Лиханов В.А., Гребнев А.В., Скрябин М.Л. Улучшение эффективных и экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха при работе на природном газе: монография / Под общ. ред. проф. В.А. Лиханова. Киров: Вятская ГСХА, 2010. 248 с.

References

1. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Improving the performance of a diesel engine with a turbocharger // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2016. No. 12. P. 13–19.

2. Grebnev A.V. The conversion of diesel engine D-245.7 to natural gas // Innovatsionnye protsessy i tekhnologii v sovremennom sel'skom khozyaystve: mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Blagoveshchensk, 2–4 dekabrya 2014 g.) [Innovative processes and technologies in modern agriculture: international scientific-practical conference. (Blagoveshchensk, December 2–4, 2014)]. V 2 ch. Ch. 2. Blagoveshchensk: Dal'GAU Publ., 2014, pp. 270–273 (in Russ.).
3. Grebnev A.V. Uluchshenie effektivnykh pokazateley dizelya s promezhutochnym okhlazhdeniem nadduvochnogo vozdukha 4ChN 11,0/12,5 pri rabote na prirodnom gaze putem sovershenstvovaniya protsessov sgoraniya i teplovydeleniya: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving of effective indicators of diesel with intermediate cooling of charge air 4CHN 11,0/12,5 when working on natural gas by improving the combustion and heat generation: Dissertation for Degree of Candidate of Technical Sciences.]. Kirov, 2009. 211 p.
4. Grebnev A.V., Skryabin M.L. The effect of the application of natural gas on the combustion process of the diesel 4CHN 11,0/12,5 with an intermediate intercooling of the charge air. // Obshchestvo, nauka, innovatsii (NPK – 2015): vseros. ezhegod. nauch.-prakt. konf.: sb. materialov: obshcheuniversitet. sektsiya, BF, KhF, FSA, FAM, ETF, FAVT, FPMT, FEM, FGSN, YuF, 13–24 aprelya 2015 g. [Society, science, innovations (NPK – 2015): All-Russian annual scientific and practical conference.: collection of materials: all-university section, BF, CF, FSA, FAM, ETF, FAVT, FPMT, FEM, FGSN, SF, April 13–24, 2015] Kirov, Vyat. gos. un-t Publ. 2015, pp. 948–952 (in Russ.).
5. Likhanov V.A., Grebnev A.V., Skryabin M.L. Uluchshenie effektivnykh i ekologicheskikh pokazateley dizelya 4ChN 11,0/12,5 s promezhutochnym okhlazhdeniem nadduvochnogo vozdukha pri rabote na prirodnom gaze: monografiya [Improving of effective and ecological parameters of the diesel 4CHN 11,0/12,5 with an intermediate cooling of charge air when working on natural gas: monograph]. Pod obshch. red. prof. V.A. Likhanova. Kirov: Vyatskaya GSKhA Publ., 2010. 248 p.