

# СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

д.т.н. Лиханов В.А., к.т.н. Гребнев А.В., к.т.н. Скрыбин М.Л., к.т.н. Торопов А.Е.

Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Киров, Россия

lv99@mail.ru

*В статье представлены графики скоростных характеристик дизеля Д-245.7 при работе по газодизельному процессу. Одним из способов повышения эффективности автомобильных перевозок в настоящее время является перевод двигателей автотранспортных средств на альтернативные, более дешевые виды топлива. Среди различных альтернативных топлив очень привлекательным является природный газ. Если переводить на природный газ дизельный двигатель, то лучшим способом перевода будет реализация газодизельного процесса. Сведений в литературе по данному вопросу еще не достаточно, поэтому исследования на подобную тему являются актуальными. В Вятской государственной сельскохозяйственной академии были проведены исследования по переводу дизеля Д-245.7 на газодизельный процесс, определены показатели процесса сгорания, характеристики тепловыделения, эффективные показатели. Работа по газодизельному процессу приводит к повышению значений показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения в цилиндре дизеля. При этом несколько возрастают тепловые и механические нагрузки. В начальные периоды сгорания в цилиндре повышается скорость и величина активного тепловыделения. Это изменение свидетельствует о том, что сгорание происходит по объемному механизму. На газодизельном процессе по сравнению с дизельным процессом происходит снижение часового расхода воздуха, уменьшается температура отработавших газов, снижается давление наддува, несколько понижается эффективный КПД, но при этом снижения мощности и крутящего момента не происходит. На основании исследований сделаны следующие выводы: 1) при переходе на газодизельный процесс повышается давление, температура в цилиндре, скорость нарастания давления, но максимальные значения этих параметров не превышают предельных допустимых значений дизельных двигателей; 2) на газодизельном процессе сгорание в цилиндре происходит по объемному механизму, большая часть топлива сгорает в фазе быстрого горения; 3) мощностные параметры двигателя на газодизельном процессе во всем скоростном диапазоне полностью соответствуют дизельному процессу; 4) при работе дизеля по внешней скоростной характеристике на газодизельном процессе по сравнению с дизельным процессом достигается снижение расхода дизельного топлива минимум на 83 % за счет замещения его природным газом.*

**Ключевые слова:** газодизель, природный газ, альтернативное топливо.

## **Введение**

Стоимость топлива является весомой статьёй расходов при эксплуатации автотранспорта. Большинство собственников автомобилей, стремясь повысить эффективность автомобильных перевозок, задумываются о переводе автомобилей на альтернативное топливо. Особое место среди всех альтернативных топлив занимает сжатый природный газ. Его преимущества – это низкая цена (менее 50 % стоимости бензина и дизельного топлива), достаточная распространенность, большие запасы на месторождениях страны [1]. Некоторые сложности возникают с заправкой и хранением природного газа на автомобиле, но с ними можно мириться.

Среди грузового и пассажирского автотранспорта наиболее распространены автомобили с дизелями в качестве силовой установки. Если рассматривать вопрос перевода дизеля на природный газ, то можно назвать два способа: газовый двигатель и газодизель. Вариант газодизель имеет определенные преимущества. Для его реализации нет необходимости существенного изменения конструкции дизеля, достаточно только установить дополнительное оборудование. Данный способ можно применять как для проектируемых дизелей, так и для уже находящихся в эксплуатации [2].

При переводе дизеля на газодизельный процесс природный газ (ПГ) подается во впускной трубопровод через газовый смеситель (рис. 1). Количество ПГ, поступающего в смеситель,

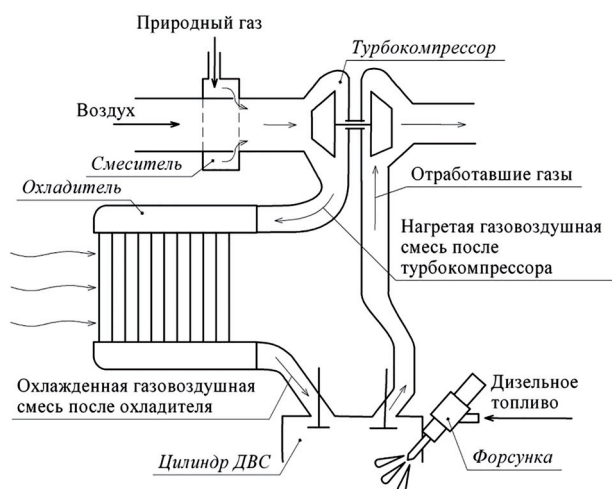


Рис. 1. Схема подачи природного газа в газодизель с турбонаддувом и промежуточным охлаждением

регулируется газовой заслонкой, установленной на идущем к смесителю трубопроводе. Попав в цилиндры, газ воспламеняется от запальной порции дизельного топлива (ДТ), впрыскиваемой штатной топливной системой. Пуск и прогрев дизеля осуществляется на ДТ без подачи ПГ. После прогрева подается ПГ, а запальная доза ДТ уменьшается до минимального предела, пока отсутствует неустойчивая работа дизеля с пропусками воспламенения [3, 4].

#### Цель и объект исследования

К настоящему времени уже проведен достаточно большой объем исследований по применению природного газа в дизелях [5].

Все же остаются еще мало изучены газодизели малой размерности, оснащенные турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха. В известных работах часто встречается то, что исследована только сама возможность применения ПГ в дизелях, при этом не затрагивается влияние ПГ на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения.

В связи с этим объектом исследований по переводу на природный газ нами был выбран дизель размерности 4ЧН 11,0/12,5 марки Д-245.7. Актуальность выбора данного дизеля обоснована широким его распространением на автотранспорте (автомобили ГАЗ, автобусы ПАЗ).

#### Материалы и методы исследования

Исследования проводились на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятской ГСХА в рамках общей темы «Улучшение эксплуатационных показателей дизелей путем применения альтернативных видов топлива» [6].

Экспериментальная установка (рис. 2) включала в себя электротормозной стенд SAK-N670, расходомеры топлива, воздуха, систему анализа отработавших газов. Снятие индикаторных диаграмм рабочего процесса осуществлялось прибором МАИ-5А, оснащенным электроискровым самописцем (рис. 3а) и датчиком давления, установленным на головке блока цилиндров дизеля (рис. 3б) [4].

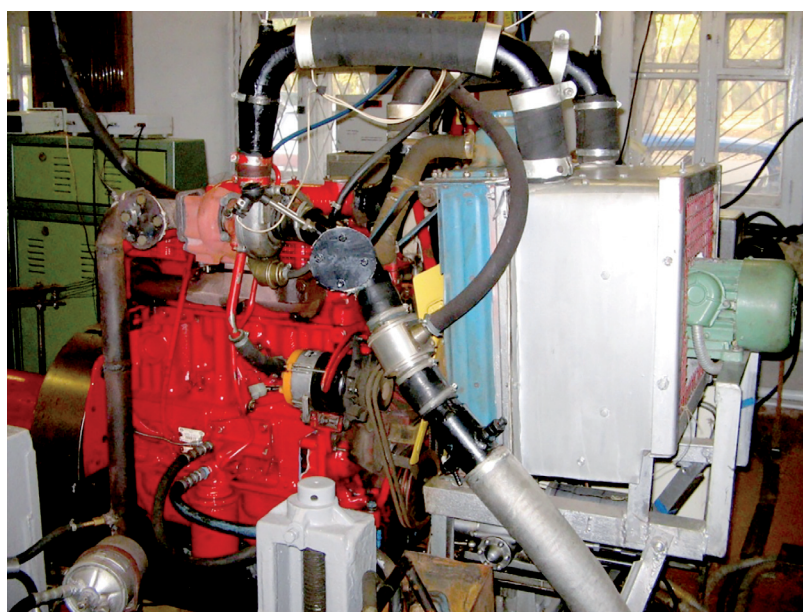
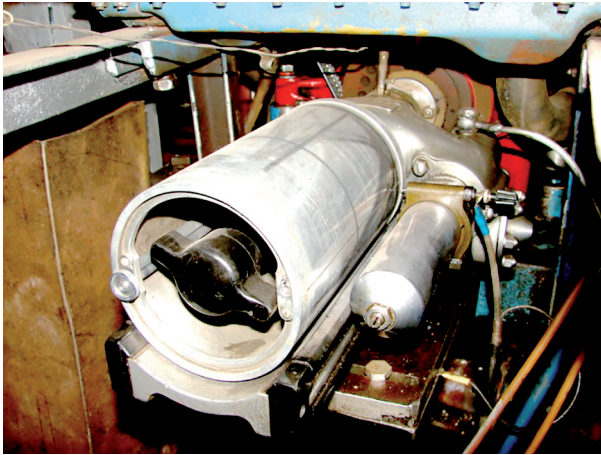
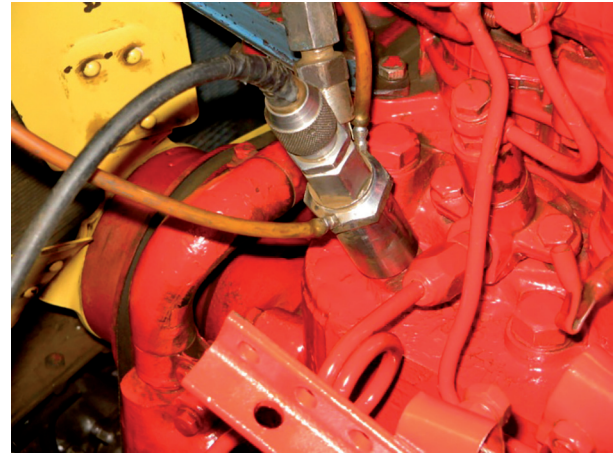


Рис. 2. Экспериментальная установка



а)



б)

Рис. 3. Оборудование для снятия индикаторных диаграмм

### Результаты и обсуждение

В результате исследований были проведены стендовые испытания со снятием внешних скоростных характеристик. При этом определялись показатели процесса сгорания, характеристики тепловыделения, эффективные показатели дизеля.

### Показатели процесса сгорания

На рис. 4 представлены совмещенные графики показателей процесса сгорания дизеля Д-245.7 для дизельного и газодизельного процессов. Показатели процесса сгорания определялись при обработке индикаторных диаграмм по методике ЦНИДИ.

Из анализа этих графиков следует, что значения всех представленных показателей газодизельного процесса располагаются выше дизельного процесса для всего скоростного диапазона работы. Например, на малой частоте вращения коленчатого вала ( $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ) при переходе с дизельного на газодизельный процесс максимальная температура газов  $T_{\text{max}}$  возрастает со значения 1730 К до 2150 К (на 24 %). На большей частоте ( $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  – номинальный скоростной режим) максимальная температура газов возрастает от 2020 К до 2350 К (на 16%). Максимальное давление сгорания  $p_{z \text{ max}}$  при переходе на газодизельный процесс при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  повышается с 12,9 МПа до 14,0 МПа (на 9 %), а при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  повышается с 13,8 МПа до 14,6 МПа (на 6 %). Степень повышения давления при переходе на газодизельный процесс при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  возрастает со значения 1,92 до 2,26, при

$n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  возрастает со значения 1,60 до 1,85. Величина максимальной скорости нарастания давления в цилиндре  $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$  на газодизельном процессе по сравнению с дизельным процессом при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  повышается со значения 0,90 МПа/градус поворота коленчатого вала (п.к.в.) до 1,01 МПа/градус п.к.в., а при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  повышается с 0,78 МПа/градус п.к.в. до 0,93 МПа/градус п.к.в. Период задержки воспламенения  $\varphi_i$  при переходе

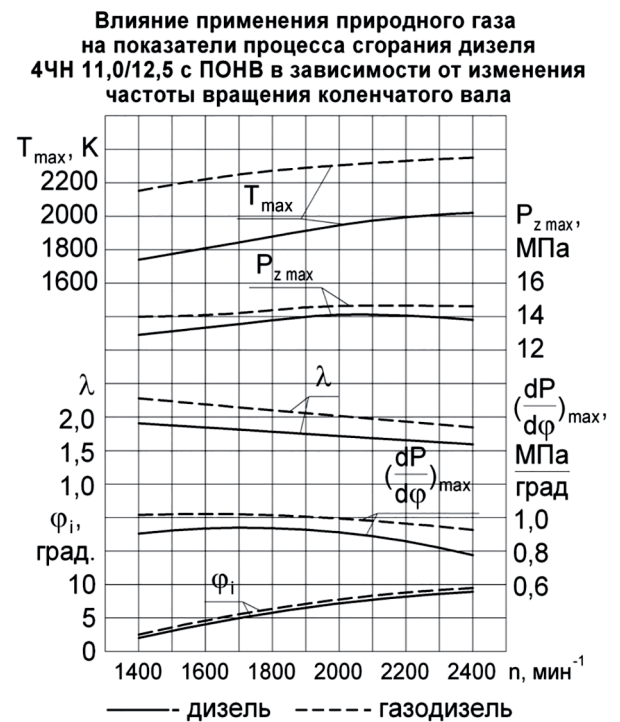


Рис. 4. Показатели процесса сгорания дизеля Д-245.7 в зависимости от частоты вращения коленчатого вала: — — дизельный процесс; - - - газодизельный процесс



на газодизельный процесс изменяется незначительно. Так, при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  происходит повышение периода задержки воспламенения с 2,0 градусов п.к.в. до 2,5 градусов п.к.в., при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  происходит повышение с 9,0 градусов п.к.в. до 9,5 градусов п.к.в.

Повышение давления, температуры газов в цилиндре на газодизельном процессе объясняется более быстрым горением природного газа, т.е. превалирует объемный механизм воспламенения. Такое изменение показателей процесса сгорания, конечно, нельзя назвать благоприятным с точки зрения надежности работы дизеля. Но в то же время повышение значений параметров не так уж и велико. Например, если взять максимальное зафиксированное значение температуры в цилиндре в 2350 К, то, например, у бензиновых двигателей температура в цилиндре достигает гораздо больших значений. Величина максимальной скорости нарастания давления газов в цилиндре не превышает или, по крайней мере, сопоставима со значением в 1,0 МПа/градус п.к.в., установленным в качестве допустимого заводом-изготовителем данного дизеля.

### Характеристики тепловыделения

На рис. 5 представлены характеристики тепловыделения дизельного и газодизельного процессов. Здесь обозначены:  $\varphi_{T_{\max}}$  – угол поворота коленчатого вала после верхней мертвой точки, соответствующий достижению в цилиндре максимальной температуры, градус п.к.в.;  $\chi_{i Pz \max}$  – активное выделение теплоты, соответствующее моменту достижения в цилиндре максимального давления сгорания;  $\chi_{i T_{\max}}$  – активное выделение теплоты, соответствующее моменту достижения максимальной температуры;  $(d\chi/d\varphi)_{\max}$  – максимальная скорость относительного тепловыделения.

Как видно на рисунке, графики газодизельного процесса располагаются выше дизельного. Величина угла  $\varphi_{T_{\max}}$  при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  при переходе с дизельного процесса на газодизельный повышается с 1,0 градуса п.к.в. до 1,5 градуса п.к.в. При  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  повышение  $\varphi_{T_{\max}}$  существеннее – с 8,0 градуса п.к.в. до 10,5 градуса п.к.в. Величина  $\chi_{i Pz \max}$  при переходе на газодизельный процесс при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  возрастает со значения 0,49 до значения 0,55 относительных единиц, при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  возрастает с 0,63 до 0,71 относительных единиц. Величина  $\chi_{i T_{\max}}$  при переходе с ди-

Влияние применения природного газа на характеристики тепловыделения дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала

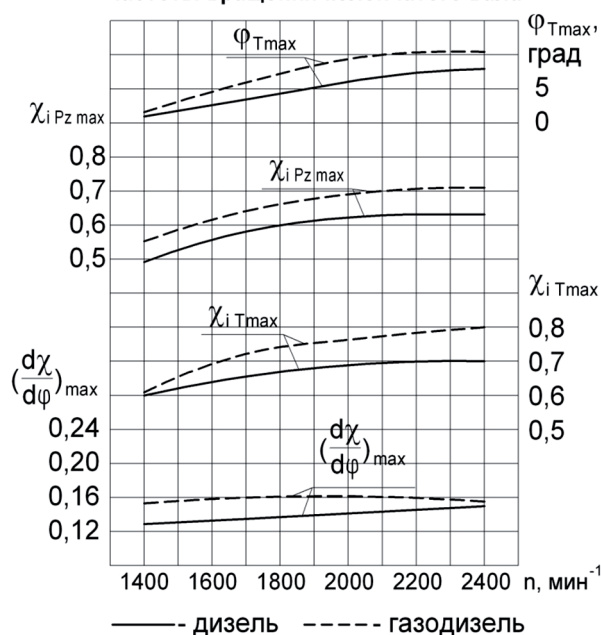


Рис. 5. Характеристики тепловыделения дизеля Д-245.7:

— — дизельный процесс;  
- - - газодизельный процесс

зельного на газодизельный процесс при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  повышается с 0,6 до 0,61 относительных единиц, при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  повышается с 0,7 до 0,8 относительных единиц. Величина  $(d\chi/d\varphi)_{\max}$  при переходе на газодизельный процесс при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  повышается с 0,128 до 0,152 относительных единиц на градус, при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  повышается с 0,150 до 0,155 относительных единиц на градус.

Причина повышения значений характеристик тепловыделения газодизельного процесса по сравнению с дизельным, как и при рассмотрении показателей процесса сгорания, также связана с протеканием сгорания в цилиндре по объемному механизму. Большая часть топлива расходуется в начальные фазы сгорания, до достижения в цилиндре максимального давления и температуры.

### Эффективные показатели

На рис. 6 представлены графики эффективных показателей дизельного и газодизельного процессов. Проанализируем графики.

Мощностные показатели дизеля при переходе с дизельного на газодизельный процесс полностью сохраняются, т.к. графики крутящего момента  $M_k$  и эффективной мощности

Влияние применения природного газа на эффективные показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала

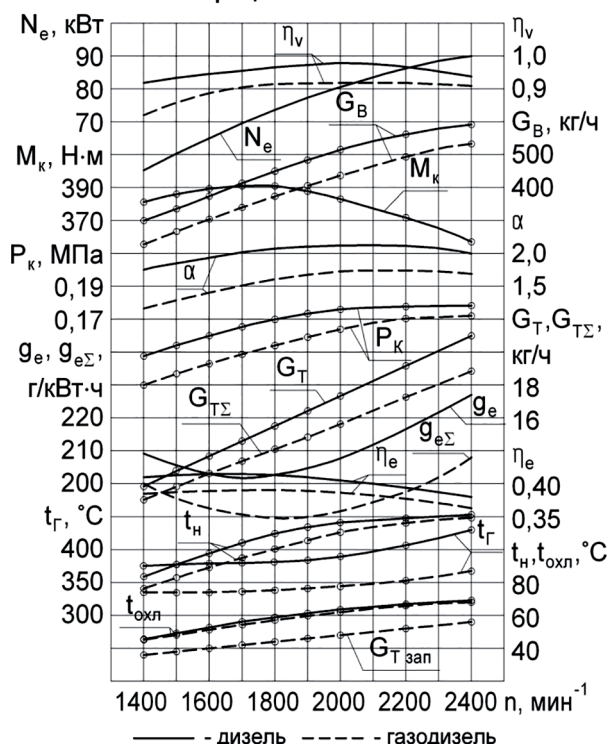


Рис.6. Эффективные показатели дизеля Д-245.7:

— — дизельный процесс;  
 - - - - газодизельный процесс

$N_e$  для этих двух процессов совпадают. Величина  $M_k$  при  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> равна 381 Н·м, при  $n = 1700$  мин<sup>-1</sup> увеличивается до 390 Н·м, затем при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> уменьшается до 358 Н·м. Величина  $N_e$  при  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> составляет 55 кВт, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> увеличивается до 90 кВт.

Часовой суммарный расход ПГ и запально-го ДТ  $G_{T\Sigma}$  на газодизельном процессе меньше часового расхода ДТ  $G_T$  дизельного процесса на всем скоростном диапазоне работы. Так, часовой расход топлива при переходе на газодизельный процесс при  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> снижается с 11,8 кг/ч до 11,0 кг/ч, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> снижается с 21 кг/ч до 18,8 кг/ч. Расход запального ДТ  $G_{T\text{ зап}}$  на газодизельном процессе при  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> составляет 1,6 кг/ч, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> составляет 3,6 кг/ч, т.е. примерно 14...17 % от расхода ДТ на дизельном процессе. Таким образом, снижение расхода дизельного топлива составляет минимум 83%. Величина удельного расхода  $g_{e\Sigma}$  на газодизельном процессе ниже  $g_e$  дизельного процесса. Так, удельный расход при переходе на газодизельный процесс при  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> снижается с 209 г/(кВт·ч) до 200 г/(кВт·ч), при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> сни-

жается с 227 г/(кВт·ч) до 208 г/(кВт·ч). Снижение часового и удельного расхода топлива на газодизельном процессе объясняется тем, что ПГ имеет большую теплотворную способность единицы массы, чем ДТ, а не тем, что рабочий процесс в цилиндре начинает протекать более эффективно. Об этом свидетельствует некоторое снижение значения эффективного КПД  $\eta_e$ . Так, при  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> значение  $\eta_e$  при переходе на газодизельный процесс снижается с 0,410 до 0,385, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> снижается с 0,380 до 0,363.

Вследствие замещения части воздуха на впуске природным газом при переходе на газодизельный процесс происходит снижение часового расхода воздуха  $G_B$ . При  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> величина  $G_B$  снижается с 300 кг/ч до 228 кг/ч, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> снижается с 591 кг/ч до 533 кг/ч. Снижение величины  $G_B$  приводит к изменению коэффициента наполнения  $\eta_v$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Так, при переходе на газодизельный процесс при  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> значение  $\eta_v$  снижается с 0,920 до 0,820, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> — с 0,938 до 0,909. Значение  $\alpha$  при  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> снижается с 1,75 до 1,16, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> — с 2,0 до 1,69.

При переходе на газодизельный процесс уменьшается температура отработавших газов  $t_r$ . Так, при  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> значение  $t_r$  (после турбины турбокомпрессора) снижается с 375 °С до 335 °С, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> — с 430 °С до 367 °С. Снижение температуры отработавших газов приводит к уменьшению давления и скорости в выпускном трубопроводе, поэтому давление  $P_k$  и температура воздуха  $t_H$  на выходе из турбокомпрессора снижаются. При  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> значение  $P_k$  снижается с 0,147 МПа до 0,130 МПа, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> — с 0,178 МПа до 0,172 МПа. При  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> температура  $t_H$  снижается с 84 °С до 76 °С, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> — с 121 °С до 119 °С. Значения температуры на выходе из охладителя  $t_{охл}$  для дизельного и газодизельного процессов совпадают. При  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup> значение  $t_{охл}$  для обоих процессов составляет 45 °С, а при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> — 68 °С.

### Выводы

На основании представленных скоростных характеристик можно сделать следующие выводы:

- при переходе на газодизельный процесс показатели процесса сгорания и харак-

теристики тепловыделения изменяются, повышаются давление, температура в цилиндре, скорость нарастания давления, но максимальные значения этих параметров не превышают предельных допустимых значений дизельных двигателей;

- на газодизельном процессе сгорание в цилиндре происходит по объемному механизму, большая часть топлива сгорает в фазе быстрого горения;
- мощностные параметры двигателя на газодизельном процессе во всем скоростном диапазоне полностью соответствуют дизельному процессу;
- при работе дизеля по внешней скоростной характеристике на газодизельном процессе по сравнению с дизельным процессом достигается снижение расхода дизельного топлива минимум на 83 % за счет замещения его природным газом.

### Литература

1. Лиханов В.А. Вместо дизтоплива – природный газ // Сельский механизатор. 1996. № 11. С. 28.
2. Лиханов В.А., Деветьяров Р.Р., Лопатин О.П., Вылегжанин П.Н. Исследование рабочих процессов в цилиндре газодизеля 4Ч 11,0/12,5. Киров: Вятская ГСХА, 2004. 330 с.
3. Долганов К.Е., Лисовал А.А., Колесник Ю.И. Система питания и регулирования для переоборудования дизелей в газодизели // Двигателестроение. 1999. № 1. С. 37-40.
4. 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. Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2009. 211 с.
5. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Применение природного газа в дизеле с турбонаддувом // Транс-

порт на альтернативном топливе. 2016. № 4(52). С. 35–43.

6. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование скоростного режима дизелей семейства ММЗ при работе на природном газе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 1(61). С. 12.

### References

1. Likhanov V.A. Instead of diesel fuel - natural gas. *Sel'skiy mekhanizator*. 1996. No 11, pp. 28 (in Russ.).
2. Likhanov V.A., Devet'yarov R.R., Lopatin O.P., Vylegzhanin P.N. *Issledovanie rabochikh protsessov v tsilindre gazodizelya 4Ch 11,0/12,5* [Research of working processes in the cylinder of a gas diesel 4Ch 11,0 / 12,5]. Kirov: Vyatskaya GSKhA Publ., 2004. 330 p.
3. Dolganov K.E., Lisoval A.A., Kolesnik Yu.I. Power supply and regulation system for conversion of diesel engines into gas diesel engines. *Dvigatelistroenie*. 1999. No 1, pp. 37–40 (in Russ.).
4. 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*: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improvement of effective indicators of 4CHN 11,0 / 12,5 diesel engine with intermediate cooling of charge air working on natural gas by improving combustion and heat generation: dissertation for a Degree of Candidate of Technical Sciences]. Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2009. 211 p.
5. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Usage of natural gas in diesel with turbo. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2016. No 4(52), pp. 35–43 (in Russ.).
6. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Research of high-speed mode of diesel engines of MTZ family working on natural gas. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2017. No 1(61), pp. 12 (in Russ.).

## SPEED CHARACTERISTICS OF AUTOMOBILE DIESEL ENGINE OPERATING ON NATURAL GAS

Dr.Eng. **V.A. Likhonov**, Ph.D. **A.V. Grebnev**, Ph.D. **M.L. Skryabin**, Ph.D. **A.E. Toropov**  
Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia,  
lv99@mail.ru

*The article presents the graphs of the D-245.7 diesel engine's high-speed characteristics during gas-diesel operation. One of the ways to improve the efficiency of road transport is now to convert vehicle engines into alternative, cheaper fuels. Among various alternative fuels, natural gas is very attractive. If the diesel engine is to be converted to natural gas, then the implementation of the gas-diesel process will be the best method of transfer. There is not enough information in the literature on this issue, so research on this topic is relevant. In the Vyatka State Agricultural Academy research was carried out on the transfer of diesel D-245.7 to the gas-diesel process, the parameters of the combustion process, heat release characteristics, and effective indicators were determined. Work on the gas-diesel process leads to increase in the values of the parameters of the combustion process and the characteristics of heat release in the cylinder of the diesel engine. At the same time, thermal and mechanical loads increase slightly. In the initial periods of combustion in the cylinder, the speed and the value of the active heat release increase. This change indicates that combustion takes place by a three-dimensional mechanism. On the gas-diesel process, as compared to the diesel process, the hourly air consumption decreases, the temperature of the exhaust gases decreases, the boost pressure decreases, the effective efficiency decreases slightly, but the power and torque do not decrease. On the basis of the research, the following conclusions are drawn: 1) during the transition to the gas-diesel process, the pressure, the temperature in the cylinder, the rate of pressure increase rises, but the maximum values of these parameters do not exceed the permissible limits of diesel engines; 2) in the gas-diesel process, combustion in the cylinder occurs by a volumetric mechanism, most of the fuel burns in the rapid combustion phase; 3) the engine power parameters at the gas-diesel process in the entire speed range fully correspond to the diesel process; 4) when the diesel engine operates on an external high-speed characteristic on a gas-diesel process compared to a diesel process, a reduction of diesel fuel consumption by at least 83 % is achieved by replacing it with natural gas.*

**Keywords:** gas diesel, natural gas, alternative fuel.