

Энергетика и электротехника

УДК 621.43.057

doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-89-98

Влияние применения сжиженного углеводородного газа на регулировки, рабочий процесс и тепловыделение тракторного дизельного двигателя

П.Ю. Малышкин¹, А.Н. Каргашевич¹, С.А. Плотников²,
Г.Э. Заболотских²

¹ УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»

² ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

Influence of using the liquefied hydrocarbon gas in adjustment, operation and heat generation of the tractor diesel engine

P.Yu. Malyshkin¹, A.N. Kartashevich¹, S.A. Plotnikov², G.E. Zabolotskikh²

¹ Belarusian State Agricultural Academy

² Federal Government-financed Educational Institution of Higher Professional Education «Vyatka State University»

Проведены теоретические и экспериментальные исследования рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) при работе на дизельном топливе с добавкой сжиженного углеводородного газа отдельной системой во впускной коллектор. Получены регрессионные зависимости удельного эффективного расхода топлива и основных экологических показателей отработавших газов дизеля от угла опережения впрыска топлива. Приведены зависимости крутящего момента, удельного эффективного расхода топлива, максимального давления в цилиндре, жесткости рабочего процесса, концентрации в отработавших газах твердых частиц, оксидов азота и их суммарной эмиссии от количества подаваемого сжиженного углеводородного газа для дизеля. Проанализированы индикаторная диаграмма и характеристики тепловыделения дизеля при работе на дизельном топливе и с добавкой сжиженного углеводородного газа. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных результатов. Обосновано количество подаваемого сжиженного углеводородного газа для дизеля, не превышающее 30 % расхода дизельного топлива. Подтверждена сходимость экспериментальных и теоретических данных на уровне 6,3 %. Установлено, что работа дизеля на дизельном топливе с добавкой до 30 % сжиженного углеводородного газа позволяет снизить суммарную эмиссию твердых частиц и оксидов азота в отработавших газах на 20,2 %.

Ключевые слова: дизель, сжиженный углеводородный газ, жесткость рабочего процесса, экологические показатели, суммарная эмиссия

The paper presents theoretical and experimental studies of the working process of the 4ChN 11.0/12.5 (D-245.5S2) diesel engine operating on diesel fuel with addition of the liquefied hydrocarbon gas by a separate system into the intake manifold. Regression dependences were obtained of the relative specific effective fuel consumption and the main ecological indicators of the diesel exhaust gases on the fuel injection advance angle. Dependences are provided of torque, specific effective fuel consumption, maximum cylinder pressure, working process rigidity, content of solid particles and nitrogen oxides, as well as of total emission, on the amount of the supplied liquefied hydrocarbon gas into the diesel engine. The indicator diagram and the diesel engine heat release characteristic were analyzed with operation on the diesel fuel and with addition of the liquefied hydrocarbon gas. The experimental setup is described. Theoretical and experimental results were compared. The amount of liquefied hydrocarbon gas supplied to the diesel engine not exceeding 30% of the diesel fuel consumption was substantiated. Convergence of experimental and theoretical data at the level of 6.3% was confirmed. It was established that the diesel engine operation with addition of up to 30% of the liquefied hydrocarbon gas made it possible to reduce total emission of the particulate matter and of the nitrogen oxides in the exhaust gases by 20.2%.

Keywords: diesel, liquefied hydrocarbon gas, working process rigidity, ecological performance, total emissions

Увеличение количества наземного транспорта повышает потребление топливно-энергетических ресурсов, поэтому человечество все чаще задумывается о том, что наступит время, когда появиться дефицит энергии. В связи с этим бережное и рациональное отношение к источникам энергии и увеличение ее полезной доли с каждым годом становится все более актуальным.

Исследовано влияние сжиженного углеводородного газа (СУГ) [1] на регулировки, рабочий процесс и тепловыделение тракторного дизельного двигателя (далее дизель) 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2), оснащенного охладителем наддувочного воздуха [2]. Для вычисления параметров дизеля, работающего на дизельном топливе (ДТ) и его смесях с СУГ (85 % ДТ + 15 % СУГ и 70 % ДТ + 30 % СУГ), использована программа ДИЗЕЛЬ-РК, основанная на методе расчета процессов смесеобразования и сгорания профессора Н.Ф. Разлейцева, доработанного А.С. Кулешовым, [3, 4]. Вычисления выполнены с учетом ранее полученных данных [5–10] и конструктивных параметров дизеля [4].

Для получения регрессионных зависимостей применена программа Microsoft Excel, для построения графиков — Corel Draw.

Результаты расчетов в виде зависимостей эффективных, экономических и экологических показателей дизеля Д-245.5S2 от угла опережения впрыска топлива (УОВТ) и количества СУГ при номинальной частоте вращения коленчатого вала $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ (далее номинальный режим) приведены на рис. 1.

Анализ полученных данных показал, что при работе дизеля в номинальном режиме на ДТ оптимальный УОВТ $\theta_{\text{впр}}^{\text{опт}} = 12,2^\circ$ обеспечивает минимальный удельный эффективный расход топлива $g_{e \text{ min}} = 210 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. Увеличение или уменьшение УОВТ относительно оптимального значения приводит к снижению крутящего момента дизеля $M_{\text{кр}}$ и повышению удельного эффективного расхода топлива g_e . Так как скоростной режим и цикловая подача топлива не меняются, часовой расход топлива $G_{\text{ДТ}}$ остается постоянным.

Основными токсичными компонентами отработавших газов (ОГ) дизеля Д-245.5S2, соответствующего экологическим нормам Stage II, являются оксиды азота и твердые частицы (PM) [9]. Для достижения наименьшей концентрации в ОГ твердых частиц PM при работе дизеля на ДТ в номинальном режиме УОВТ должен составлять $16...20^\circ$. Однако это сопровождается увеличением максимального давления в цилиндре P_z , ростом концентрации оксидов азота в ОГ и максимальной скоростью нарастания давления (жесткостью рабочего процесса) $dp/d\phi$. Наименьшая концентрация оксидов азота в ОГ достигается при УОВТ $\theta_{\text{впр}} \leq 0...2^\circ$, но при этом повышается концентрация твердых частиц в ОГ.

Суммарная эмиссия твердых частиц и оксидов азота определяется выражением [11, 12]

$$SE = C_{PM} (PM/0,15) + C_{NO} (NO_x/7), \quad (1)$$

где C_{PM} и C_{NO_x} — эмпирические весовые коэффициенты для эмиссии твердых частиц и оксидов азота, $C_{PM} = 0,5$, $C_{NO_x} = 1,0$.

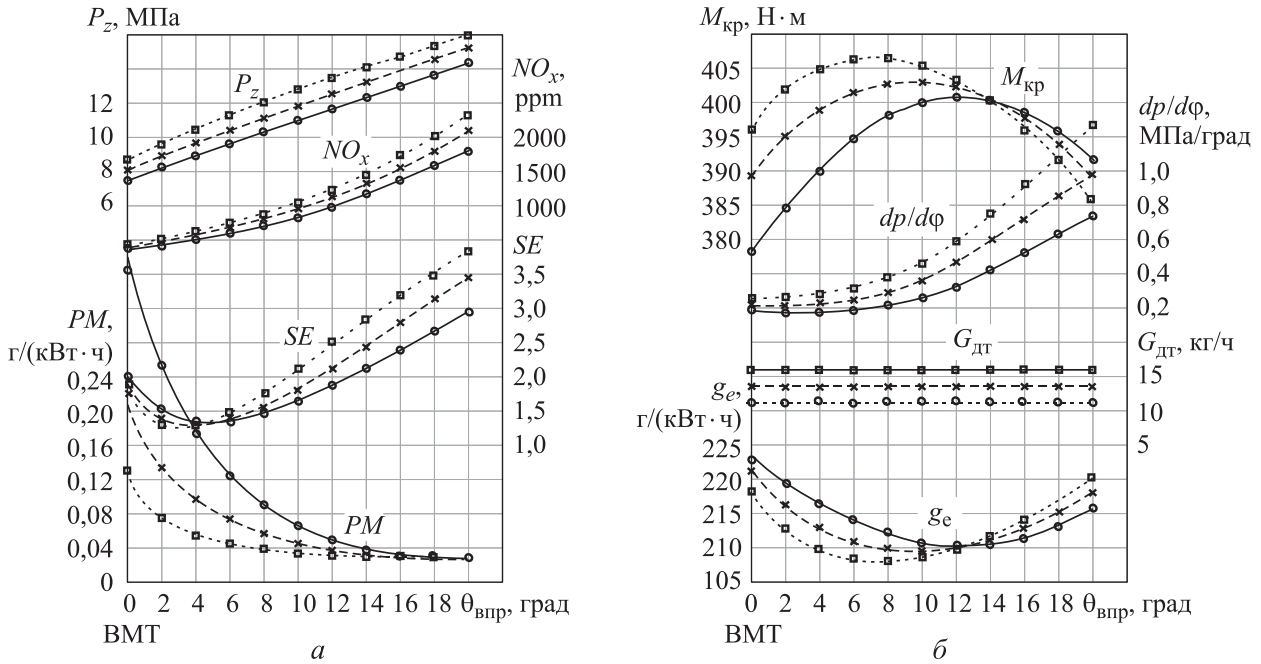


Рис. 1. Зависимости показателей дизеля Д-245.5S2 от УОВТ $\theta_{впр}$ при работе в номинальном режиме на ДТ (○—○), топливе, содержащем 85 % ДТ + 15 % СУГ (×—×) и 70 % ДТ + 30 % СУГ (□—□): а — максимального давления в цилиндре P_z , концентрации в ОГ оксидов азота NO_x , твердых частиц PM и их суммарной эмиссии SE ; б — крутящего момента $M_{кр}$, скорости нарастания давления $dp/d\phi$, часового расхода топлива $G_{дт}$, удельного эффективного расхода топлива g_e

Как видно из рис. 1, а наименьшее значение суммарной эмиссии SE , достигаемое при УОВТ $\theta_{впр} = 4 \dots 8^\circ$, имеет дизель, работающий на ДТ.

Так как лучшая топливная экономичность и максимальный крутящий момент дизеля Д-245.5S2, работающего на ДТ, наблюдаются при УОВТ $\theta_{впр} = 12^\circ$, это значение можно было бы считать оптимальным УОВТ. Однако с учетом экологического класса дизеля оптимальным УОВТ следует принять $4 \pm 1^\circ$, что соответствует рекомендуемому заводом-изготовителем установочному УОВТ $\theta_{уст.впр} = 4 \pm 0,5^\circ$.

По результатам расчета показателей дизеля Д-245.5S2, работающего в номинальном режиме на ДТ, получены следующие зависимости удельного эффективного расхода топлива, концентрации в ОГ твердых частиц, оксидов азота и их суммарной эмиссии SE от УОВТ:

$$g_e = 8,37 \cdot 10^5 \theta_{впрДТ}^2 - 0,00204 \theta_{впрДТ} + 0,22246, \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}; \tag{2}$$

$$PM = 0,2719e^{-0,215\theta_{впрДТ}}, \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}; \tag{3}$$

$$NO_x = 2,4589\theta_{впрДТ}^2 + 22,45\theta_{впрДТ} + 348, \text{ ppm}; \tag{4}$$

$$SE = -0,0004\theta_{впрДТ}^3 + 0,0211\theta_{впрДТ}^2 - 0,2\theta_{впрДТ} + 1,6686, \tag{5}$$

где $\theta_{впрДТ}$ — угол опережения впрыска ДТ в градусах поворота коленчатого вала (ПКВ) до верхней мертвой точки (ВМТ), $\theta_{впрДТ} = 0 \dots 20^\circ$ ПКВ.

Относительные изменения удельного эффективного расхода топлива Δg_e , содержания в ОГ твердых частиц ΔPM , оксидов азота ΔNO_x и суммарной эмиссии ΔSE в зависимости от УОВТ в дизеле Д-245.5S2, работающем на ДТ в номинальном режиме, описываются следующими выражениями:

$$\Delta g_e = 0,0396\theta_{впр}^2 - 0,0206\theta_{впр}, \text{ \%}; \tag{6}$$

$$\Delta PM = 0,0006\theta_{впр}^5 + 0,0145\theta_{впр}^4 - 0,1497\theta_{впр}^3 + 18685\theta_{впр}^2 - 21,797\theta_{впр} + 4,4473, \text{ \%}; \tag{7}$$

$$\Delta NO_x = 0,2386\theta_{впр}^2 + 8,5148\theta_{впр} + 0,5785, \text{ \%}; \tag{8}$$

$$\Delta SE = -0,0247\theta_{впр}^3 + 0,4017\theta_{впр}^2 + 8,4\theta_{впр} + 1,4163, \text{ \%}; \tag{9}$$

где $\theta_{впр}$ — угол опережения впрыска ДТ, $\theta_{впр} = -15 \dots 0 \dots +15^\circ$; за нулевую точку принят

УОВТ, при котором достигается наилучшая топливная экономичность дизеля.

Уменьшение УОВТ на $6,35^\circ$ ПКВ (по сравнению с УОВТ, обеспечивающим наилучшую топливную экономичность дизеля) позволяет снизить NO_x на 43 % и SE на 29 % до минимального значения 1,14. Однако это сопряжено с увеличением g_e на 1,7 % и PM в 2,9 раза.

При работе дизеля на ДТ с добавкой СУГ несколько изменяется характер кривых крутящего момента дизеля, удельного эффективного расхода топлива, содержания в ОГ твердых частиц, влажных оксидов азота и суммарной эмиссии SE . Максимальные значения крутящего момента $M_{кр}$ достигаются при меньших значениях УОВТ и увеличении количества подаваемого СУГ.

При функционировании дизеля Д-245.5S2 в номинальном режиме на топливе, содержащем 70 % ДТ и 30 % СУГ, минимальный удельный эффективный расход топлива $g_{e\min} = 207$ г/(кВт·ч) достигается при УОВТ $\theta_{впр} = 6...10^\circ$, а минимальная суммарная эмиссия $SE = 1,23$ — при $\theta_{впр} = 2...4^\circ$.

При работе дизеля Д-245.5S2 в номинальном режиме на топливе, включающем в себя 85 % ДТ и 15 % СУГ, с учетом экологического класса оптимальным УОВТ следует считать $\theta_{впр}^{opt} = 3,5 \pm 1,0^\circ$, а при его эксплуатации на топливной смеси 70 % ДТ с 30 % СУГ — $\theta_{впр}^{opt} = 3,0 \pm 1,0^\circ$.

Работа дизеля на ДТ с добавкой более 30 % СУГ приводит к увеличению максимального давления в цилиндре, жесткости рабочего процесса и суммарной эмиссии твердых частиц и оксидов азота, вследствие чего является нецелесообразной с точки зрения выбросов вредных веществ во внешнюю среду.

По результатам расчета показателей дизеля Д-245.5S2 при работе в номинальном режиме на топливе, содержащем 70 % ДТ и 30 % СУГ, получены следующие зависимости удельного эффективного расхода топлива, содержания в ОГ твердых частиц, оксидов азота и суммарной эмиссии SE от УОВТ:

$$g_e = -6,11 \cdot 10^6 \theta_{впрДТ}^2 + 0,0003188 \theta_{впрДТ}^2 - 0,003983 \theta_{впрДТ} + 0,2211, \text{ г/(кВт·ч);} \quad (10)$$

$$PM = 0,0281 e^{-0,1 \theta_{впрДТ}}, \text{ г/(кВт·ч);} \quad (11)$$

$$NO_x = 500 e^{0,0875 \theta_{впрДТ}}, \text{ ppm;} \quad (12)$$

$$SE = -0,0004 \theta_{впрДТ}^3 + 0,0294 \theta_{впрДТ}^2 - 0,1698 \theta_{впрДТ} + 1,5905. \quad (13)$$

Относительные изменения удельного эффективного расхода топлива Δg_e , концентрации в ОГ твердых частиц ΔPM , оксидов азота ΔNO_x и суммарной эмиссии ΔSE в зависимости от УОВТ для дизеля Д-245.5S2, работающего в номинальном режиме на топливе, содержащем 70 % ДТ и 30 % СУГ, описываются следующими выражениями:

$$\Delta g_e = -0,003 \theta_{впр}^3 + 0,0846 \theta_{впр}^2 - 0,0508 \theta_{впр}, \text{ %;} \quad (14)$$

$$\Delta PM = -0,000009 \theta_{впр}^5 + 0,0005 \theta_{впр}^4 - 0,0166 \theta_{впр}^3 + 0,4964 \theta_{впр}^2 - 10,001 \theta_{впр} + 0,036, \text{ %;} \quad (15)$$

$$\Delta NO_x = 0,4447 \theta_{впр}^2 + 10,862 \theta_{впр} - 1,691, \text{ %;} \quad (16)$$

$$\Delta SE = 4 \cdot 10^{-16} \theta_{впр}^4 - 0,0475 \theta_{впр}^3 + 0,6261 \theta_{впр}^2 + 8,5572 \theta_{впр}, \text{ %;} \quad (17)$$

Изменение угла опережения впрыска ДТ с добавкой 0...30 % СУГ для дизеля Д-245.5S2, работающего в номинальном режиме, описывается выражением

$$\theta_{впрГТ} = 3,33 G_r + \theta_{впр}^{opt}, \text{ град;} \quad (18)$$

где G_r — количество подаваемого СУГ, доля от расхода ДТ; индекс «ГТ» соответствует газовому топливу (ГТ).

Изменения крутящего момента $M_{кр}$, удельного эффективного расхода топлива g_e , максимального давления в цилиндре P_z , жесткости рабочего процесса $dp/d\varphi$, содержания в ОГ твердых частиц PM , оксидов азота NO_x и суммарной эмиссии SE в зависимости от количества СУГ при работе дизеля Д-245.5S2 в номинальном режиме описываются следующими регрессионными выражениями:

$$M_{кр} = -17,754 G_r^2 + 38,968 G_r + M_{крДТ}, \text{ Н·м;} \quad (19)$$

$$g_e = -7,7778 G_r^2 - 21,833 G_r + g_{eДТ}, \text{ г/(кВт·ч);} \quad (20)$$

$$P_z = -3,3333 G_r^2 + 5,8333 G_r + P_{zДТ}, \text{ МПа;} \quad (21)$$

$$dp/d\varphi = 0,7778 G_r^2 + 0,1967 G_r + (dp/d\varphi)_{ДТ}, \text{ МПа/град;} \quad (22)$$

$$NO_x = 168,67 G_r^2 + 176,5 G_r + NO_{xДТ}, \text{ ppm;} \quad (23)$$

$$PM = 0,3556G_r^2 - 0,4667G_r + PM_{ДТ}, \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}; \quad (24)$$

$$SE = -1,037G_r^2 - 0,3175G_r + SE_{ДТ}, \quad (25)$$

где $M_{крДТ}$, g_e , P_z и $(dp/d\phi)_{ДТ}$ — крутящий момент, удельный эффективный расход топлива, максимальное давление в цилиндре и жесткость рабочего процесса дизеля, используемого в качестве топлива ДТ, соответственно; $NO_{xДТ}$ и $PM_{ДТ}$ — содержание в ОГ оксидов азота и твердых частиц при работе дизеля на ДТ; $SE_{ДТ}$ — суммарная эмиссия твердых частиц и оксидов азота дизеля, работающего на ДТ, определяемая выражением (1).

Индикаторная диаграмма и характеристики тепловыделения, полученные с помощью программы ДИЗЕЛЬ-РК, при ранее определенных значениях оптимального УОВТ приведены на рис. 2, а и б.

Как видно из рис. 2, а, при работе дизеля на ДТ с добавкой СУГ в номинальном режиме происходит увеличение максимального давления в цилиндре относительно $P_{zДТ} = 86,8$ МПа ($\theta_{впр}^{opt} = 4,0^\circ$): для топлива 85 % ДТ + 15 % СУГ — $P_{zДТ15} = 97,2$ МПа ($\theta_{впр}^{opt} = 3,5^\circ$); для топлива 70 % ДТ + 30% СУГ — $P_{zДТ30} = 101,3$ МПа ($\theta_{впр}^{opt} = 3,0^\circ$).

Также наблюдается быстрый рост температуры в зоне сгорания. В то же время максимальные значения температуры T_{max} почти не изменяются и достигаются при угле поворота коленчатого вала $\phi = 13...18^\circ$, а к концу сгорания (при $\phi = 90^\circ$) несколько снижаются (см. рис. 2, б).

Анализ кривых выделения теплоты χ и скорости тепловыделения $d\chi/d\phi$ (см. рис. 2, б) позволяет заключить, что сгорание ДТ с добавкой СУГ начинается позднее, чем ДТ, но проходит быстрее. Однако уже при угле поворота коленчатого вала $\phi > 40^\circ$ скорость тепловыделения снижается. Повышение максимальной скорости тепловыделения $d\chi/d\phi$ обусловлено увеличением периода задержки воспламенения, в течение которого впрыскивается большее количество ДТ, сгорающее впоследствии интенсивнее. Сгорание ДТ с добавкой СУГ заканчивается несколько раньше (при $\phi = 80...90^\circ$), чем ДТ (при $\phi_{ДТ} = 104^\circ$).

Оценить достоверность предлагаемых выражений (2)–(25) и полученные данные можно путем сравнения результатов экспериментальных и теоретических исследований. Для проверки теоретических исследований проведено индицирование рабочего процесса дизеля в ак-

кредитованной научно-исследовательской лаборатории испытания двигателей внутреннего сгорания и топлив на кафедре «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства» УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».

При стендовых испытаниях в качестве силовой экспериментальной установки использован дизель Д-245.5S2 производства ОАО «Минский моторный завод», дополненный газовой системой питания [13] и необходимыми измери-

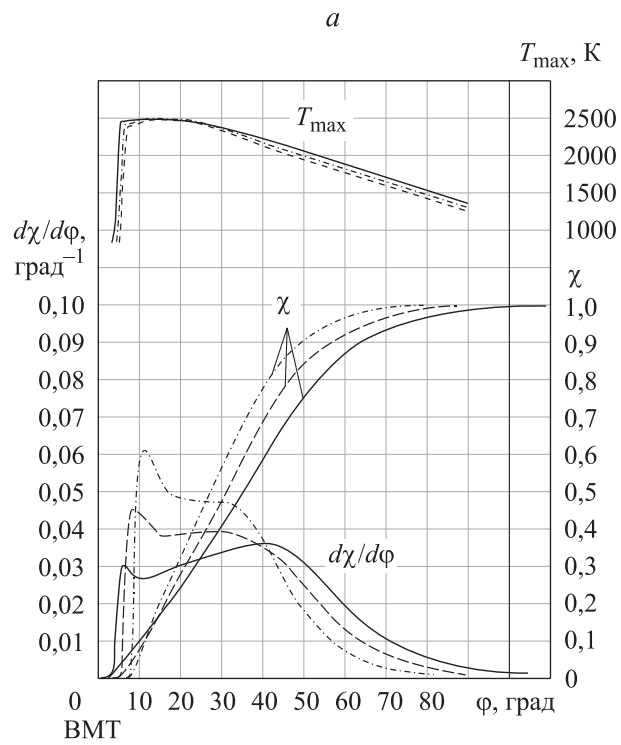
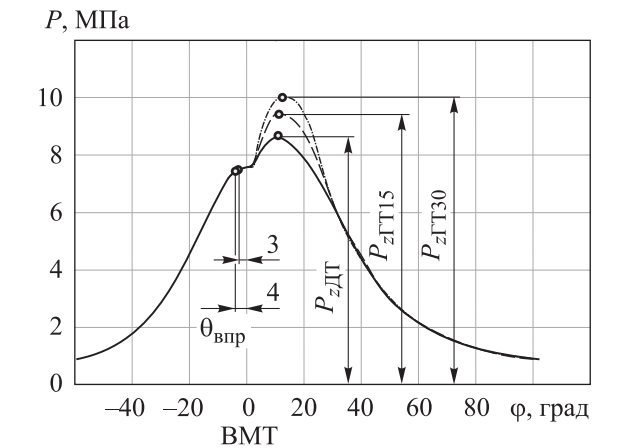


Рис. 2. Индикаторная диаграмма (а) и характеристики тепловыделения (б) дизеля Д-245.5S2, работающего в номинальном режиме на различном топливе:
 — ДТ; — — — 85 % ДТ + 15 % СУГ;
 — 70 % ДТ + 30% СУГ

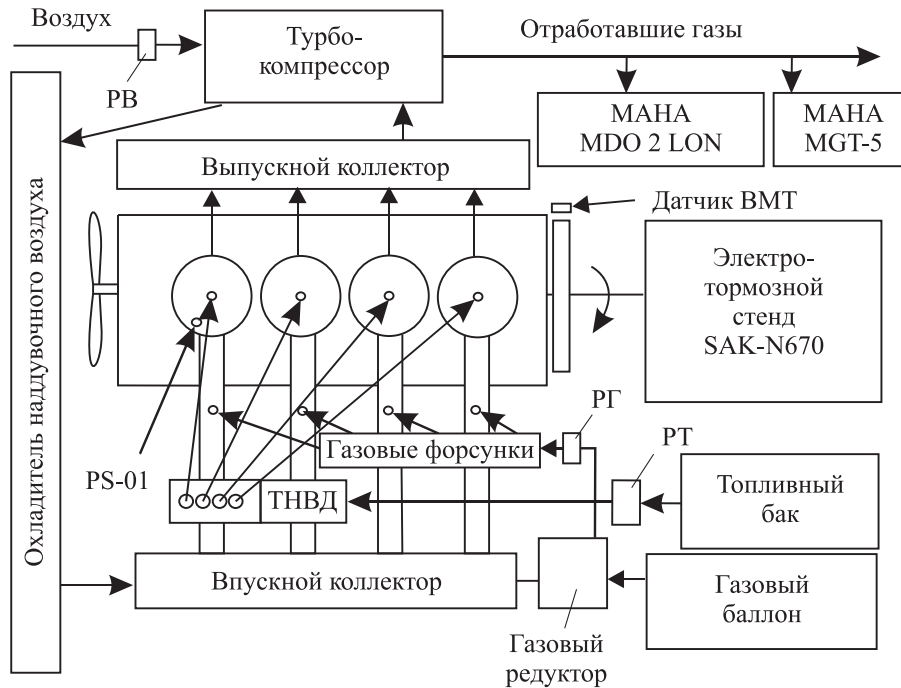


Рис. 3. Схема силовой экспериментальной установки:
 PB — расходомер воздуха; РГ — расходомер газа; РТ — расходомер топлива;
 ТНВД — топливный насос высокого давления

тельными приборами (рис. 3). Нагрузку дизелю создавал электротормозной стенд SAK-N670 (Германия) с балансирной маятниковой машиной RAPIDO.

Отбор и анализ ОГ осуществлялись газоанализатором МАНА MGT-5 и дымомером МАНА MDO 2 LON [14, 15] с соблюдением требований [16] и инструкций [17] к приборам [18].

Для синхронизации положения поршня на маховике дизеля установлен отметчик ВМТ поршня первого цилиндра, а на защитном кожухе маховика — датчик Холла (датчик ВМТ), позволяющий точно определить положение поршня первого цилиндра в ВМТ и соединенный с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) cDAQ-9178 компании National Instru-

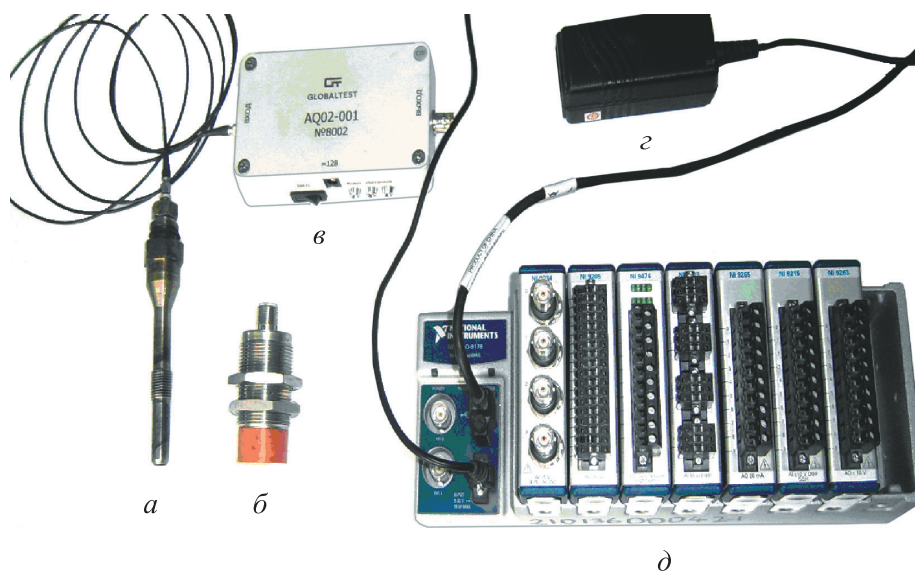


Рис. 4. Внешний вид приборов для индицирования дизеля:
 а — пьезокварцевый датчика динамического давления PS-01; б — датчика ВМТ;
 в — усилителя сигнала; г — блока питания; д — АЦП cDAQ-9178

**Расчетные и экспериментальные значения параметров дизеля Д-245.5S2,
работающего в номинальном режиме**

Параметр	Вид топлива					
	ДТ		85 % ДТ + 15 % СУГ		70 % ДТ + 30 % СУГ	
	Значение	Δ , %	Значение	Δ , %	Значение	Δ , %
$M_{кр}$, Н·м	392,1/378,2	3,7	397,5/378,2	5,1	402,1/378,2	6,3
g_e , г/(кВт·ч)	217,05/223,1	2,7	213,6/220,5	3,1	209,8/213,3	1,6
p_z , МПа	8,68/9,10	4,6	9,48/9,81	3,4	10,13/10,64	4,8
$dp/d\phi$, МПа/град	0,194/0,203	4,4	0,241/0,248	2,8	0,323/0,332	2,7
NO_x , ppm	494,0/465,7	6,1	524,3/498,0	5,3	562,2/529,0	6,3
PM , г/(кВт·ч)	0,168/0,179	6,1	0,106/0,113	5,8	0,060/0,062	2,8
SE	1,42/1,46	2,7	1,35/1,28	5,0	1,23/1,16	5,6

Примечание. В числителе дроби указаны расчетные значения, в знаменателе — экспериментальные.

ments (рис. 4). Пьезокварцевый датчик динамического давления PS-01 вмонтирован с помощью специального адаптера в головку блока цилиндров дизеля вместо свечи накаливания первого цилиндра.

Измерительные сигналы после усилителя (рис. 4, в) и АЦП поступали в персональный компьютер, где записывались с помощью программы Measurement & Automation Explorer в виде диаграмм. Запись данных индицирования проводилась после стабилизации параметров дизеля в течение 1 мин работы. Индикаторные диаграммы рабочего процесса дизеля обрабатывались с помощью персонального компьютера по методике ЦНИДИ [19, 20].

Расчетные и экспериментальные значения параметров дизеля Д-245.5S2, работающего в номинальном режиме, приведены в таблице, где Δ — относительная погрешность.

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет констатировать достаточную сходимость

расчетных и экспериментальных результатов, полученных при работе дизеля с добавкой СУГ в номинальном режиме при оптимальных значениях УОВТ.

Выводы

1. Предложенные регрессионные зависимости можно использовать для предварительной оценки относительного изменения удельного эффективного расхода топлива, токсичности и дымности ОГ дизеля, работающего на чистом ДТ и с добавкой СУГ.

2. Сходимость экспериментальных и теоретических данных не превышает 6,3 %, что позволяет считать указанные регрессионные зависимости работоспособными.

3. Работа дизеля на ДТ с добавкой СУГ с содержанием до 30 % снижает суммарную эмиссию твердых частиц и оксидов азота в ОГ дизеля на 20,2 %.

Литература

- [1] Паспорт качества сжиженного углеводородного топлива. Речица, Белоруснефть, 2012. 1 с.
- [2] Дизели Д-245S2, Д-245.2S2, Д-245.5S2, Д-245.16S2, Д-245.16LS2, Д-245.42S2, Д-245.43S2. Руководство по эксплуатации. Минск, Минский моторный завод, 2010. 104 с.
- [3] Кулешов А.С., Фадеев Ю.М., Кулешов А.А. Развитие многозонных моделей для расчета сгорания в современных ДВС. *Двигателестроение*, 2017, № 2, с. 7–10.
- [4] Кулешов А.С., Марков В.А., Фурман В.В. и др. Расчетное исследование влияния запальной дозы дизельного топлива на рабочий процесс газодизельного двигателя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 12, с. 87–106, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-12-87-106>

- [5] Муратов А.В. Концепция использования альтернативных видов топлива в энергетических установках тягового автономного подвижного состава. *Вестник транспорта Поволжья*, 2020, № 4, с. 71–76.
- [6] Якубович А.И., Кухаренок Г.М., Тарасенко В.Е. *Экономия топлива на тракторах*. Минск, БНТУ, 2009. 229 с.
- [7] Двигатели, работающие на метаноле (по материалам Конгресса СИМАС). *Двигателестроение*, 2021, № 1, с. 37–48.
- [8] Василенко Д.В., Сараханова Н.С., Зинин В.Л. Декарбонизация транспортного сектора в странах Северного измерения. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2020, № 6, с. 31–47.
- [9] Модина М.А., Шкода В.В., Туктаров Р.Р. Эффективность методов сокращения количества выбросов оксидов серы от судовых энергетических установок. *Эксплуатация морского транспорта*, 2020, № 2, с. 87–92, doi: <https://doi.org/10.34046/aumsuomt95/15>
- [10] Базаров Б., Ахматжанов Р., Сидиков Ф. и др. Тяговые и топливно-экономические свойства автобусов, работающих на сжатом природном газе. *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии*, 2022, т. 15, № 8, с. 931–939, doi: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0428>
- [11] Бердник А.Н. Влияние регулировок рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания на выделение токсичных веществ с отработавшими газами. *Ученые заметки ТОГУ*, 2020, т. 11, № 1. URL: <https://ejournal.pnu.edu.ru/ejournal/pub/articles/2639/>
- [12] ТКП 17.08-01-2006. *Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью до 25 МВт*.
- [13] Карташевич А.Н., Малышкин П.Ю. *Электронная система впрыска газового топлива в дизель*. Патент ВУ 20130295. Заявл. 05.04.2013, опубл. 30.04.2014.
- [14] Плотников С.А., Карташевич А.Н., Мотовилов М.В. Оценка показателей процесса сгорания и тепловыделения в дизеле с предварительным подогревом топлива. *Инженерные технологии и системы*, 2021, т. 31, № 3, с. 349–363, doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.349-363>
- [15] Карташевич А.Н., Малышкин П.Ю. Влияние подачи газового топлива на экологические показатели дизеля. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*, 2013, № 3, с. 110–116.
- [16] ГОСТ 18509–88. *Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний*. Москва, Изд-во стандартов, 1988. 69 с.
- [17] *Анализатор выхлопных газов двигателя. MGT 5*. Инструкция по эксплуатации. Санкт-Петербург, Маха Руссия, 2004. 33 с.
- [18] *Дымомер для дизельных двигателей MDO2-LON*. Руководство по эксплуатации. Санкт-Петербург, Маха Руссия, 2005. 68 с.
- [19] Лазурько В.П., Кудрявцев В.А. Программа обработки индикаторных диаграмм дизелей на алгоритмическом языке «Базисный фортран». *Тр. ЦНИДИ*, 1975, № 6, с. 46–54.
- [20] Плотников С.А., Ланских Ю.В., Бузииков Ш.В. и др. *Расчет динамики тепловыделения в ДВС*. Свид. об офиц. рег. прог. для ЭВМ № 2015660120 от 22.09.2015.

References

- [1] *Passport kachestva szhizhennogo uglevodorodnogo topliva* [Liquefied petroleum gas quality passport]. Rechitsa, Belarusneft Publ., 2012. 1 p. (In Russ.).
- [2] *Dizeli D-245S2, D-245.2S2, D-245.5S2, D-245.16S2, D-245.16LS2, D-245.42S2, D-245.43S2*. Rukovodstvo po ekspluatatsii [D-245S2, D-245.2S2, D-245.5S2, D-245.16S2, D-245.16LS2, D-245.42S2, D-245.43S2 diesels. Operating manual]. Minsk, Minskiy motorny zavod Publ., 2010. 104 p. (In Russ.).
- [3] Kuleshov A.S., Fadeev Yu.M., Kuleshov A.A. Development of multizonal combustion models as applied to modern reciprocating engines. *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2017, no. 2, pp. 7–10. (In Russ.).
- [4] Kuleshov A.S., Markov V.A., Furman V.V. et al. Computational study of the diesel fuel ignition dose effecting the gas-diesel engine operation process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

- zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 12, pp. 87–106, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-12-87-106> (in Russ.).
- [5] Muratov A.V. Concept of alternative fuels use in power units of traction autonomous rolling stock. *Vestnik transporta Povolzhya*, 2020, no. 4, pp. 71–76. (In Russ.).
- [6] Yakubovich A.I., Kukharenek G.M., Tarasenko V.E. *Ekonomiya topliva na traktorakh* [Fuel economy in tractors]. Minsk, BNTU Publ., 2009. 229 p. (In Russ.).
- [7] Methanol as engine fuel (based on CIMAC papers). *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2021, no. 1, pp. 37–48. (In Russ.).
- [8] Vasilenko D.V., Sarakhanova N.S., Zinin V.L. Decarbonization of the transport sector in the northern dimension countries. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2020, no. 6, pp. 31–47. (In Russ.).
- [9] Modina M.A., Shkoda V.V., Tuktarov R.R. Efficiency of methods for reducing the amount of sulphur oxide emissions from ship power plants. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, 2020, no. 2, pp. 87–92, doi: <https://doi.org/10.34046/aumsuomt95/15> (in Russ.).
- [10] Bazarov B., Akhmatzhanov R., Sidikov F. et al. Traction and fuel-economic properties of buses, compressed natural gas. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Ser. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies], 2022, vol. 15, no. 8, pp. 931–939, doi: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0428> (in Russ.).
- [11] Berdnik A.N. Influence of adjustments of the working process of the internal combustion engine on the issue of toxic substances with exhaust gases. *Uchenye zametki TOGU* [Scientists notes PNU], 2020, vol. 11, no. 1. URL: <https://ejournal.pnu.edu.ru/ejournal/pub/articles/2639/> (in Russ.).
- [12] ТКР 17.08-01–2006. *Poryadok opredeleniya vybrosov pri szhiganii topliva v kotlakh teploproduzvoditelnostyu do 25 MVt*. [Technical code of practice ТКР 17.08-01-2006. Procedure for determining emissions from fuel combustion in boilers with a heat output of up to 25 MW]. (In Russ.).
- [13] Kartashevich A.N., Malyshkin P.Yu. *Elektronnaya sistema vpryska gazovogo topliva v dizel* [Electronic gas injection system for diesel]. Patent BY 20130295. Appl. 05.04.2013, publ. 30.04.2014.
- [14] Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Motovilov M.V. Evaluation of combustion performance and heat release in preheated fuel consumed diesel engines. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy* [Engineering Technologies and Systems], 2021, vol. 31, no. 3, pp. 349–363, doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.349-363>
- [15] Kartashevich A.N., Malyshkin P.Yu. Influence of gas fuel supply on environmental performance of diesel engine. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*, 2013, no. 3, pp. 110–116. (In Russ.).
- [16] GOST 18509–88. *Dizeli traktornye i kombaynovye. Metody stendovykh ispytaniy* [State standard GOST 18509–88. Tractor and combine diesel engines. Methods of bench tests]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1988. 69 p. (In Russ.).
- [17] *Analizator vykhlopnykh gazov dvigatelya. MGT 5. Instruksiya po ekspluatatsii* [Engine exhaust gas analyser. MGT 5. Operating manual]. Sankt-Petersburg, Maha Russia Publ., 2004. 33 p. (In Russ.).
- [18] *Dymomer dlya dizelnykh dvigateley MDO2-LON. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Smoke meter for diesel engines MDO2-LON. Operating manual]. Sankt-Petersburg, Maha Russia Publ., 2005. 68 p. (In Russ.).
- [19] Lazurko V.P., Kudryavtsev V.A. Diesel indicator diagram processing program using "Basic Fortran" algorithmic language. *Tr. TsNIDI*, 1975, no. 6, pp. 46–54. (In Russ.).
- [20] Plotnikov S.A., Lanskih Yu.V., Buzikov Sh.V. et al. *Raschet dinamiki teplovydeleniya v DVS. Svid. ob ofits. reg. prog. dlya EVM № 2015660120 ot 22.09.2015* [Calculation of the heat release dynamics in an internal combustion engine. Software reg. cert. no. 2015660120 of 22.09.2015]. (In Russ.).

Информация об авторах

МАЛЫШКИН Павел Юрьевич — старший преподаватель кафедры «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства». УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (213410, Могилевская обл., Горки, Республика Беларусь, ул. Мичурина, д. 5, e-mail: pavelm36@yandex.by).

КАРТАШЕВИЧ Анатолий Николаевич — доктор технических наук, профессор, заслуженный работник образования Республики Беларусь, заведующий кафедрой «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства». УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (213410, Могилевская обл., Горки, Республика Беларусь, ул. Мичурина, д. 5, e-mail: kartashevich@yandex.ru).

ПЛОТНИКОВ Сергей Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: plotnikovsa@bk.ru).

ЗАБОЛОТСКИХ Георгий Эдуардович — аспирант кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: zabolotskikh88@yandex.ru).

Information about the authors

MALYSHKIN Pavel Yurievich — Senior Lecturer, Department of Tractors, Vehicles and Machines for Environmental Management. Belarusian State Agricultural Academy (213410, Mogilev region, Gorki, Republic of Belarus, Michurina St., Bldg. 5, e-mail: pavelm36@yandex.by).

KARTASHEVICH Anatoly Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Head of the Department Tractors, Vehicles and Machines for Environmental Management. Belarusian State Agricultural Academy (213410, Mogilev region, Gorki, Republic of Belarus, Michurina St., Bldg. 5, e-mail: kartashevich@yandex.ru).

PLOTNIKOV Sergey Aleksandrovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Federal Government-financed Educational Institution of Higher Professional Education Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: plot-nikovsa@bk.ru).

ZABOLOTSKIKH Georgiy Eduardovich — Postgraduate, Department of Mechanical Engineering Technology. Federal Government-financed Educational Institution of Higher Professional Education Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: zabolotskikh88@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Малышкин П.Ю., Карташевич А.Н., Плотников С.А., Заболотских Г.Э. Влияние применения сжиженного углеводородного газа на регулировки, рабочий процесс и тепловыделение тракторного дизельного двигателя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 6, с. 89–98, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-89-98

Please cite this article in English as:

Malyshkin P.Yu., Kartashevich A.N., Plotnikov S.A., Zabolotskikh G.E. Influence of using the liquefied hydrocarbon gas in adjustment, operation and heat generation of the tractor diesel engine. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 6, pp. 89–98, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-89-98