

Энергетика и электротехника

УДК 621.436.12

doi: 10.18698/0536-1044-2023-8-117-125

Исследование тепловыделения в дизеле при работе на газовом топливе

П.Ю. Малышкин¹, А.Н. Карташевич¹, С.А. Плотников²,
Г.Э. Заболотских²

¹ УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»

² ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

Heat release in a diesel engine operating on the gas fuel

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

Исследован процесс сгорания, обеспечивающий работу тракторного дизеля с внешним смесеобразованием, с целью определения вида и доли газового топлива, добавляемого в цилиндры дизеля трактора со свежим зарядом, при котором происходит изменение внутреннего смесеобразования на внешнее. Для подтверждения достоверности теоретических предположений проведены экспериментальные исследования дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) на нагрузочном электротормозном стенде RAPIDO SAK N670 (производства Германия) с балансирующей маятниковой машиной мощностью 250 кВт и использованием специализированного оборудования для индирования. Теоретически обосновано изменение внутреннего смесеобразования в цилиндрах дизеля трактора на внешнее, происходящее при постоянной скорости впрыскивания дизельного топлива. Для заданного нагрузочно-скоростного режима работы определен вид газового топлива — пропан-бутановая смесь, добавляемая к основному дизельному топливу в количестве 38 % по массе и более. Экспериментально установлено, что добавление до 40 % газового топлива к дизельному полностью исключает диффузионную фазу процесса сгорания, что свидетельствует о переходе работы дизеля с внутреннего смесеобразования на внешнее.

Ключевые слова: тепловыделение в дизеле, газовое топливо, пропан-бутановая смесь, кинетическая фаза, диффузионная фаза, процесс сгорания

The paper studies the combustion process that ensures operation of a tractor diesel engine with external mixture formation to determine type and proportion of the gas fuel added to the tractor diesel engine cylinders with fresh charge providing alteration in the mixture formation from internal to the external. To confirm reliability of the theoretical assumptions, the 4CHN 11.0/12.5 (D-245.5S2) diesel engine was experimentally studied on the RAPIDO SAK N679 load electric brake stand (Germany) with the 250 kW balancing pendulum machine and using specialized equipment for indexing. Alteration from the internal mixture formation in the tractor diesel cylinders to the external occurring at the constant diesel fuel injection rate was theoretically substantiated. For the given load-speed operation

mode, the type of gas fuel was determined, i.e. the propane-butane mixture added to the main diesel fuel in an amount of 38 % or more by weight. It was experimentally established that addition of up to 40 % gas fuel to the diesel fuel completely eliminated the diffusion phase in the combustion process, which indicated transition of the diesel engine operation from the internal mixture formation to the external.

Keywords: heat release in diesel, gas fuel, propane-butane mixture, kinetic phase, diffusion phase, combustion process

На сегодняшний день значительную часть рынка потребителей газомоторного топлива занимает сельскохозяйственное производство [1]. Это связано прежде всего со снижением негативного воздействия мобильных энергетических средств (тракторов) на внешнюю среду [2], вследствие чего оно является одним из важнейших эксплуатационных требований.

К настоящему времени проведены значительные теоретические и экспериментальные работы по улучшению экологических показателей колесных тракторов и силовых установок. Значительный вклад в развитие теории трактора внесли В.Я. Анилович, И.Б. Барский, Ф.С. Беспялый, Ю.Т. Водолаженко, В.В. Гуськов, В.А. Ким, Г.А. Котиев, И.П. Ксеневич, Г.М. Кутьков, А.Н. Максименко, А.М. Машенский, К.Г. Попык, И.С. Сазонов, А.В. Савочкин, В.А. Скотников, А.С. Солонский, И.Ф. Троицкий и другие ученые [3–15].

Однако большинство исследований посвящено определению возможности работы дизельного двигателя (далее дизель) трактора на газовых топливах (ГТ) либо улучшения его эффективных или экологических показателей, а вопросу рассмотрения процесса сгорания ГТ должного внимания не уделено [12, 13].

Существенного совершенствования процесса сгорания дизеля трактора можно было бы добиться, организовав его работу с учетом преимуществ функционирования двигателя внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием. Это позволило бы обеспечить работу дизеля трактора на почти гомогенной топливовоздушной смеси при достаточно высокой геометрической и действительной степенях сжатия. Следовательно, удалось бы снизить выброс сажевых частиц, энергию на смесеобразование и удельный расход топлива, форсировать дизель трактора по частоте вращения коленчатого вала и увеличить литровую мощность.

Таким образом, реализация работы дизеля с внешним смесеобразованием позволила бы достичь высоких эксплуатационных показателей колесных тракторов без увеличения тепловой и

механической нагруженности основных деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Это в свою очередь не снижало бы надежность и долговечность трактора.

Цель работы — определение вида и доли ГТ, добавляемого в цилиндры дизеля трактора со свежим зарядом, при котором происходит изменение внутреннего смесеобразования на внешнее.

Научная новизна работы заключается в качественном и количественном определении доли добавляемого ГТ к основному топливу — дизельному (ДТ), при которой происходит начало изменения смесеобразования дизеля трактора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи. Во-первых, теоретически обосновать условие, при котором происходит изменение смесеобразования в цилиндрах дизеля трактора с внутреннего на внешнее. Во-вторых, определить вид и количество ГТ, при котором изменяется процесс смесеобразования. В-третьих, провести верификацию теоретических предположений путем экспериментальных исследований работы дизеля трактора на ДТ с добавкой ГТ.

Рассмотрим процесс сгорания топлива в цилиндре тракторного дизеля, задавшись некоторыми ограничениями. Камеру сгорания (КС) тракторного дизеля будем рассматривать как закрытую термодинамическую систему. Для получения основных уравнений воспользуемся законами сохранения массы и энергии. Принимаем, что масса рабочего тела (РТ) изменяется с течением времени за счет впрыскивания топлива.

В этом случае уравнение сохранения массы РТ для КС имеет вид

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_{\text{вп}}}{d\varphi} + \frac{dm_{\text{впр}}}{d\varphi}, \quad (1)$$

где $dm/d\varphi$, $dm_{\text{вп}}/d\varphi$ и $dm_{\text{впр}}/d\varphi$ — скорость изменения массы РТ в КС дизеля трактора,

топлива, поданного во впускной коллектор и впрыснутого в КС, соответственно, кг.

Так как масса топлива, поданного во впускной коллектор, остается постоянной, запишем $dm_{\text{вп}}/d\varphi = 0$. Принимая во внимание зависимость изменения массы РТ и тепловыделения в КС, получаем

$$\frac{dQ_{\chi}}{d\varphi} = \frac{dm}{d\varphi} (H_u^{\text{ГТ}} + H_u^{\text{ДТ}}), \quad (2)$$

где $dQ_{\chi}/d\varphi$ — скорость тепловыделения, МДж/град; $H_u^{\text{ГТ}}$ и $H_u^{\text{ДТ}}$ — низшая расчетная теплота сгорания ГТ и ДТ, МДж/кг.

Согласно первому закону термодинамики для закрытой термодинамической системы, уравнение сохранения энергии имеет вид

$$\frac{dU}{d\varphi} = \frac{dQ}{d\varphi} - \frac{dL}{d\varphi}, \quad (3)$$

где $dU/d\varphi$ — изменение внутренней энергии РТ в КС дизеля трактора, МДж/град; $dQ/d\varphi$ — количество теплоты, затрачиваемой на изменение внутренней энергии РТ в КС дизеля трактора, МДж/град; $dL/d\varphi$ — механическая работа, выполняемая РТ, МДж/град;

Количество теплоты, затрачиваемой на изменение внутренней энергии РТ в КС дизеля трактора, определяется выражением

$$\frac{dQ}{d\varphi} = \frac{dQ_{\chi}}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi}. \quad (4)$$

Здесь $dQ_w/d\varphi$ — теплоотдача в стенки КС, МДж/град,

$$\frac{dQ_w}{d\varphi} = \frac{\alpha_{\text{т}}}{6n} \pi D_{\text{п}} \left\{ \frac{D_{\text{п}}}{4} + R_{\text{к}} \times \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda_{\text{к}}}{4} (1 - \cos 2\varphi) - k\lambda_{\text{к}} \sin \varphi \right] + F_{\text{КС}} \right\} \times (T_{\text{max}} - T_w),$$

где $\alpha_{\text{т}}$ — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); n — частота вращения коленчатого вала дизеля трактора, мин⁻¹; $D_{\text{п}}$ — диаметр поршня, м; $R_{\text{к}}$ — радиус кривошипа, м; φ — угол поворота коленчатого вала (ПКВ) дизеля трактора, град; $\lambda_{\text{к}}$ — кинематический показатель; k — относительное смещение дезаксиального механизма; $F_{\text{КС}}$ — площадь КС цилиндра дизеля трактора, м²; T_{max} — осредненная температура цикла, К; T_w — температура стенок КС дизеля трактора, К.

Механическая работа, выполняемая РТ, имеет вид

$$\frac{dL}{d\varphi} = p \frac{dV}{d\varphi},$$

где p — текущее давление РТ в КС дизеля трактора, МПа; $dV/d\varphi$ — изменение объема РТ, м³,

$$\frac{dV}{d\varphi} = \frac{\pi^2 D_{\text{п}}^2 n R_{\text{к}}}{2} \left(\sin \varphi + \frac{\lambda_{\text{к}}}{2} \sin 2\varphi - k\lambda_{\text{к}} \cos \varphi \right).$$

После подстановки выражения (4) в формулу (3) и преобразований получаем

$$\frac{dQ_{\chi}}{d\varphi} = \frac{dU}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} + \frac{dL}{d\varphi}.$$

Известно, что скорость тепловыделения имеет два основных экстремума [11]. Один из них находится в кинетической фазе процесса сгорания, а другой — в диффузионной. Условие, при котором тепловыделение во второй диффузионной фазе процесса сгорания полностью исключено, будет соответствовать только одному экстремуму скорости тепловыделения. Это и будет означать переход процесса сгорания дизеля трактора к внешнему смесеобразованию.

Для отыскания этого условия, приравняем первую производную скорости тепловыделения к нулю, т. е. $d^2Q_{\chi}/d\varphi^2 = 0$. Преобразуя выражение (2) с учетом изложенного, запишем

$$\frac{d^2m}{d\varphi^2} (H_u^{\text{ГТ}} + H_u^{\text{ДТ}}) = 0.$$

Анализ выражения (9) показал, что произведение двух членов будет равно нулю в случае равенства нулю одного из них, а именно $d^2m/d\varphi^2 = 0$. Тогда находим производную выражения (1):

$$\frac{d^2m_{\text{вп}}}{d\varphi^2} + \frac{d^2m_{\text{впр}}}{d\varphi^2} = 0.$$

Так как $dm_{\text{вп}}/d\varphi = 0$, то и $d^2m_{\text{вп}}/d\varphi^2 = 0$, отсюда следует, что $d^2m_{\text{впр}}/d\varphi^2 = 0$. Можно сделать вывод, что необходимым условием для исключения диффузионной фазы процесса сгорания в дизеле является постоянство скорости впрыскивания ДТ.

Согласно дифференциальному закону впрыскивания топлива, характерному для многих тракторных дизелей, постоянная скорость впрыскивания топлива соответствует периоду задержки воспламенения дизеля трактора. Поэтому минимальной порцией впрыскиваемого ДТ будет та часть цикловой подачи, которая необходима для начала процесса видимого сгорания.



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки для стендовых исследований дизеля трактора Беларус МТЗ-952

В связи с этим в зависимости от нагрузочно-скоростного режима работы дизеля трактора, действительного угла опережения впрыскивания топлива, а также давления и температуры, при которых начался процесс впрыскивания, можно определить вид и количество подаваемого ГТ, необходимого для продолжения процесса сгорания.

Для расчета выбран дизель 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) трактора Беларус МТЗ-952 при работе в номинальном режиме при частоте вращения коленчатого вала $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузке 1,0 МПа, а также при действительном угле начала впрыскивания топлива 18° ПКВ до верхней мертвой точки (ВМТ) и соответствующих ему давлению 3,1 МПа и температуре 900 К.

В качестве ГТ для рассматриваемого дизеля трактора при заданном нагрузочно-скоростном режиме работы целесообразно использовать пропан-бутановую смесь с добавлением ее к основному ДТ от 38 % по массе и более.

Для определения достоверности теоретических предположений проведены эксперимен-

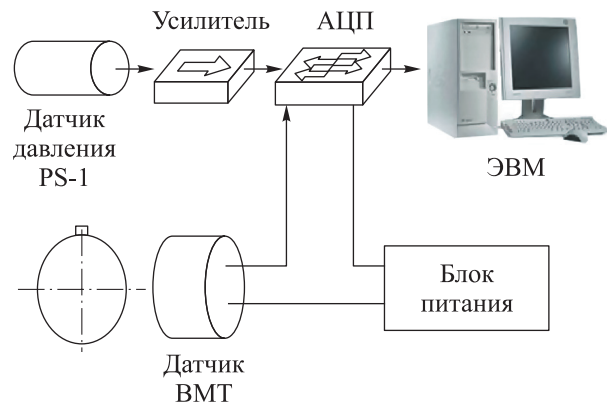


Рис. 2. Схема подключения приборов для индицирования дизеля трактора Беларус МТЗ-952

тальные исследования дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) трактора Беларус МТЗ-952 на нагрузочном электротормозном стенде RAPIDO SAK N670 (производства Германия) с балансирной маятниковой машиной мощностью 250 кВт (рис. 1) с использованием специализированного оборудования для индицирования.

Экспериментальная установка располагалась в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории испытаний двигателей внутреннего сгорания УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия». Стенд для испытаний имел приборную базу для контроля эффективных показателей дизеля (см. таблицу). Все приборы на время проведения экспериментальных исследований прошли государственную поверку.

Для выполнения индицирования на маховике устанавливали отметчик ВМТ, а на защитном кожухе маховика — датчик Холла, соединенный с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) cDAQ-9178 производства компании National Instruments (рис. 2 и 3).

Параметры приборов, входящих в состав стенда

Параметр	Прибор		Отклонение от контрольного значения, %
	Наименование	Модель	
Расход топлива	Расходомер	АИР-50	$\pm 0,50$
Крутящий момент дизеля	Весовой механизм	SAK-N670	$\pm 0,50$
Расход воздуха	Трубка Вентури	ДК	$\pm 0,04$
Температура отработавших газов	Потенциометр	КСП-4	$\pm 0,25$
Частота вращения коленчатого вала дизеля	Тахометр	AVL DISpeed492	$\pm 0,02$
Расход топлива	Объемный датчик	ДРТ-5+СКРТ 31	$\pm 1,00$

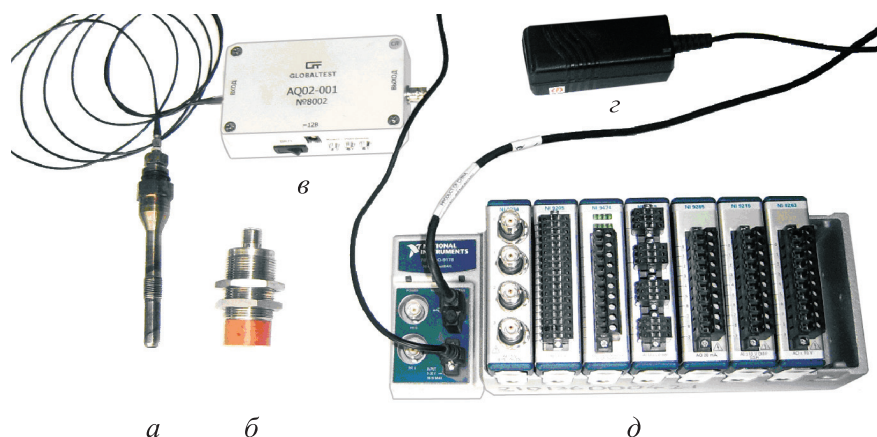


Рис. 3. Внешний вид приборов для индирования дизеля трактора Беларус МТЗ-952: а — пьезокварцевый датчика динамического давления PS-01 с адаптером; б — датчика ВМТ; в — усилителя сигнала; з — блока питания; д — АЦП сDAQ-9178

Датчик Холла, определяющий положение коленчатого вала, позволял точно находить положение поршня первого цилиндра в ВМТ. Пьезокварцевый датчик динамического давления PS-01 оборудовали специальным адаптером (см. рис. 3), который устанавливали в головку блока цилиндров дизеля трактора Беларус МТЗ-952 вместо свечи накаливания первого цилиндра [12].

Погрешность измерения давления в цилиндре дизеля в диапазоне 0,1...25,0 МПа составляла $\pm 3\%$.

Измерительные сигналы после усилителя и АЦП поступали в ЭВМ и записывались с помощью программы Measurement & Automation Explorer в виде индикаторных диаграмм.

Исследования проводили на ДТ и топливе, содержащем ДТ и ГТ (пропан-бутановую смесь), в номинальном режиме работы дизеля трактора при частоте вращения коленчатого

вала $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$. ГТ подавали впрыскиванием во впускной трубопровод дизеля трактора Беларус МТЗ-952. Количество подаваемого ГТ задавал блок управления по заложенной программе через рампу газовых форсунок Valtek Type 30, расположенную во впускном коллекторе для каждого цилиндра (рис. 4).

Для поддержания необходимого давления в газовой магистрали применяли дифференциальный газовый редуктор Landi Ranzo Type IG1. Запас ГТ хранился в газовом баллоне АГ-30/1 производства Новогрудского завода газовой аппаратуры с полезной вместимостью 24 л.

Результаты экспериментальных исследований дизеля трактора Беларус МТЗ-952 при работе на ДТ и газодизельном топливе (ГД) приведены на рис. 5, где $P_{z \text{ д}}$ и $P_{z \text{ ГД}}$ — максимальное давления цикла ДТ и ГД соответственно.

Анализ индикаторных диаграмм дизеля трактора Беларус МТЗ-952 показал, что увеличение доли ГТ в свежем заряде с 0 до 40% приводило к возрастанию максимального давления цикла с 11,2 до 14,3 МПа, степени повышения давления λ с 1,64 до 2,1, максимальной скорости нарастания давления $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ с 0,487 до 0,641 МПа/град и средней скорости нарастания давления $\Delta p/\Delta \phi$ с 0,346 до 0,638 МПа/град, а также к снижению угла ПКВ, соответствующего максимальному давлению цикла, ϕ_z от 6 до 4° ПКВ после ВМТ.

Остальные значения показателей процесса сгорания, такие как давление начала видимого сгорания P'_c , давление сжатия P_c , угол ПКВ, соответствующий давлению начала видимого сгорания, ϕ'_c и угол ПКВ, соответствующий давлению сжатия, ϕ_c не изменились вслед-

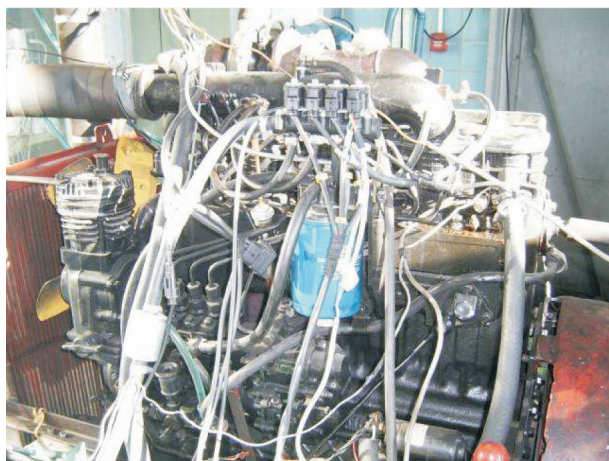


Рис. 4. Внешний вид дизеля с системой подачи ГТ

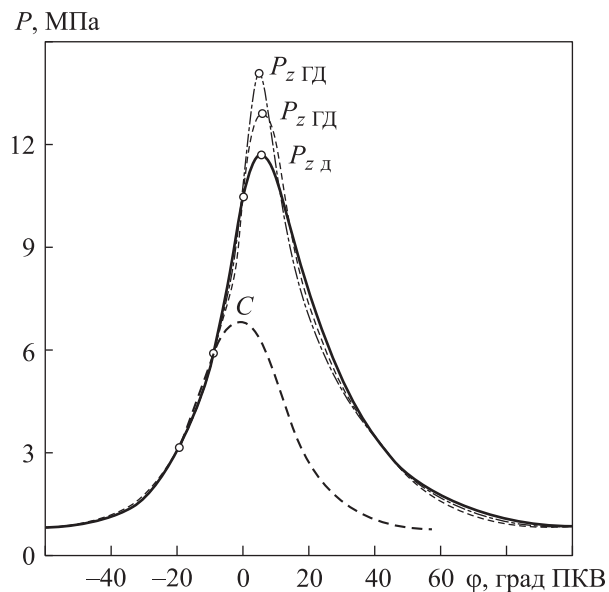


Рис. 5. Индикаторная диаграмма дизеля трактора Беларус МТЗ-952, работающего на различном топливе:
 — — ДТ; --- — 20 % ГТ + 80 % ДТ;
 -.- - 40 % ГТ + 60% ДТ

ствие увеличения доли ГТ в топливной смеси и составили 6,0 МПа, 6,8 МПа, 9 и 0° ПКВ ВМТ соответственно.

Такой характер изменения показателей процесса сгорания обусловлен наличием ГТ в свежем заряде, который приводит к изменению закона ввода теплоты в цилиндры дизеля трактора Беларус МТЗ-952 [14].

В результате обработки индикаторных диаграмм дизеля трактора Беларус МТЗ-952 по методике ЦНИДИ-ЦИАМ получены диаграммы тепловыделения при его работе на ДТ и ГД (рис. 6).

Анализ диаграмм тепловыделения показал, что увеличение доли ГТ в свежем заряде с 0 до 40 % приводило к снижению максимальной скорости тепловыделения в кинетической фазе $(d\chi/d\varphi)_k$ от 0,12 до 0,08 град⁻¹, угла ПКВ, соответствующего максимальной скорости тепловыделения в кинетической фазе, φ_k от 3 до 1° ПКВ до ВМТ, максимальной скорости тепловыделения в диффузионной фазе $(d\chi/d\varphi)_d$ от 0,055 до 0,025 град⁻¹ и угла ПКВ, соответствующего максимальной скорости тепловыделения в диффузионной фазе, φ_d от 25 до 12° ПКВ после ВМТ.

Зависимости активного тепловыделения χ свидетельствуют о том, что увеличение доли ГТ с 0 до 40 % приводило к повышению интегрального тепловыделения в кинетической фазе

процесса сгорания в среднем на 14 %. Тепловыделение же в диффузионной фазе процесса сгорания полностью соответствовало работе дизеля на ДТ. Окончание процесса тепловыделения дизеля трактора Беларус МТЗ-952, работающего как на ДТ, так и на ГД, соответствовало углу ПКВ 40° после ВМТ.

Увеличение доли ГТ с 0 до 40 % в диапазоне угла ПКВ от φ'_c и до достижения максимальной температуры цикла $\varphi_{T_{max}}$ сопровождалось повышением осредненной температуры цикла T_{max} в среднем на 4 %, а в диапазоне от $\varphi_{T_{max}}$ и до окончания процесса сгорания — снижением T_{max} в среднем на 18 %. Максимальное значение T_{max} также снижалось от 2400 до 2300 К.

Как видно из приведенных диаграмм, работа дизеля трактора Беларус МТЗ-952 на топливной смеси, содержащей от 40 % ГТ, приводила к полному исключению диффузионной фазы процесса сгорания, при которой происходит интенсивное взаимное проникание локальных зон КС, внутри которых сосредоточены продукты сгорания, несгоревшие пары и капли топлива, а снаружи — зоны со свежим воздухом или смесью воздуха с продуктами сгорания [11]. Таким образом, добавление ГТ в указан-

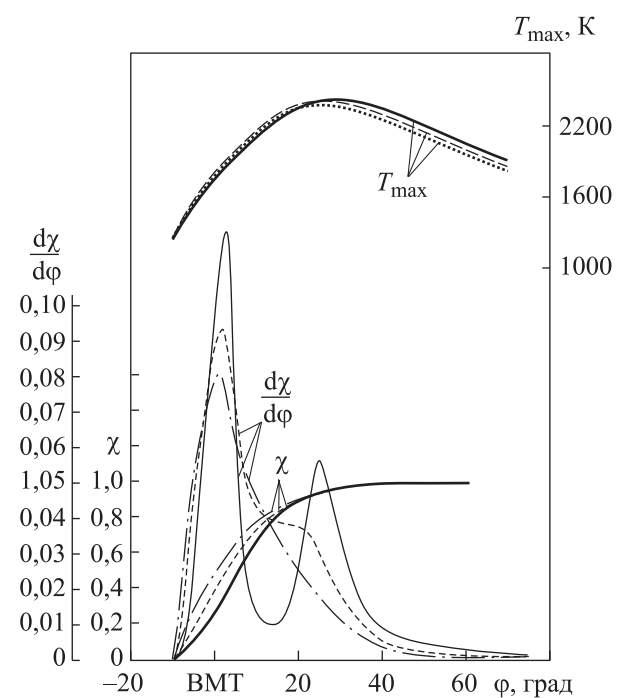


Рис. 6. Диаграмма тепловыделения дизеля трактора Беларус МТЗ-952, работающего на различном топливе:
 — — ДТ; --- — 20 % ГТ + 80 % ДТ;
 -.- - 40 % ГТ + 60% ДТ

ном количестве приводило к переходу внутреннего смесеобразования дизеля на внешнее.

Выводы

1. Теоретически обосновано изменение смесеобразования в цилиндрах дизеля трактора с внутреннего на внешнее, происходящее при постоянной скорости впрыскивания ДТ.

2. Для рассмотренного дизеля трактора при заданном нагрузочно-скоростном режиме работы определен вид ГТ в виде пропан-бутано-

вой смеси, добавляемой к ДТ в количестве от 38 % по массе и более.

3. Проведена верификация теоретических предположений путем экспериментальных исследований работы дизеля трактора Беларус МТЗ-952 на ДТ с добавкой ГТ в виде пропан-бутановой смеси. Установлено, что добавление доли ГТ до 40 % полностью исключает диффузионную фазу процесса сгорания, что свидетельствует о переходе работы дизеля с внутреннего смесеобразования на внешнее.

Литература

- [1] Шарифуллин Э.И., Нурмиев А.А. Перевод тракторов и автомобилей на газовое топливо. *Агроинженерная наука XXI века. Науч. тр. всерос. науч.-практ. конф.* Казань, КГАУ, 2022, с. 155–159.
- [2] Шарифуллин Э.И. Перевод тракторов и автомобилей на газовое топливо. *Студенческая наука — аграрному производству. Мат. 79-ой студ. нац. науч. конф.* Т. 2. Казань, КГАУ, 2021, с. 225–227.
- [3] Ерохин М.Н., Дидманидзе О.Н., Парлюк Е.П. и др. Энергоэффективность газового ДВС в агропромышленном комплексе. *Чтения академика В.Н. Болтинского.* Москва, Мегapolis, 2020, с. 38–50.
- [4] Хакимов Р.Т., Огнев О.Г. Использование природного газа в качестве моторного топлива для автотракторной техники. *Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта.* Екатеринбург, Изд-во УрФУ, 2022, с. 39–41.
- [5] Гнедова Л.А., Гриценко К.А., Лапушкин Н.А. и др. Эффективность применения ГМТ в сельском хозяйстве. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2016, № 1, с. 24–33.
- [6] Керученко Л.С., Захаров С.В. Работа газодизельного двигателя при неустановившейся нагрузке. *Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях. Сб. всерос. науч.-практ. конф.* Омск, ОмГАУ, 2019, с. 149–152.
- [7] Захаров С.В., Керученко Л.С. Работа газодизельного двигателя при неустановившейся нагрузке. В: *Каталог научных и инновационных разработок ФГБОУ ВО Омский ГАУ.* Омск, ОмГАУ, 2021, с. 564–568.
- [8] Картошкин А.П., Фомичев А.И., Филимонов В.А. Результаты стендовых испытаний трактора МТЗ-80 с газобаллонным оборудованием на устойчивость против опрокидывания. *Известия ММАО*, 2022, № 61, с. 53–57.
- [9] Дидманидзе О.Н., Девянин С.Н., Парлюк Е.П. Стратегия развития тракторостроения в России. *Современные достижения аграрной науки. Науч. тр. всерос. науч.-практ. конф.* Казань, КГАУ, 2020, с. 273–279.
- [10] Хакимов Р.Т., Хабушев Р.Р. и др. Энергоэффективность газомоторной техники в полевых условиях. *Известия ММАО*, 2021, № 53, с. 32–38.
- [11] Romanyuk V., Likhanov V.A., Lopatin O.P. Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas. *Теоретическая и прикладная экология*, 2018, № 3, с. 27–32, doi: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-3-027-032>
- [12] Карташевич А.Н., Малышкин П.Ю. Улучшение энергетических свойств колесного трактора при работе на смешанном дизельно-газовом топливе. *Агропанорама*, 2020, № 4, с. 36–40.
- [13] Малышкин П.Ю. Обеспечение тяговой характеристики колесного трактора при работе на смешанном дизельно-газовом топливе. *Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства. Вып. 6.* Горки, БГСХА, 2021, с. 220–224.

- [14] Бузиков Ш.В., Плотников С.А., Козлов И.С. Определение предельной концентрации рапсового масла в смесевом топливе применяемое в дизеле. *Вестник транспорта Поволжья*, 2021, № 1, с. 72–79.
- [15] Плотников С.А., Ланских Ю.В., Бузиков Ш.В. и др. *Расчет динамики тепловыделения в ДВС*. Свид. об офиц. рег. прог. для ЭВМ № 2015660120 от 22.09.2015.

References

- [1] Sharifullin E.I., Nurmiev A.A. [Transfer of tractors and cars for gas fuel]. *Agroinzhenernaya nauka XXI veka. Nauch. tr. vseros. nauch.-prakt. konf.* [Agroengineering Science of the XXI Century. Proc. Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Kazan, KGAU Publ., 2022, pp. 155–159. (In Russ.).
- [2] Sharifullin E.I. [Transfer of tractors and cars for gas fuel]. *Studencheskaya nauka — agrarnomu proizvodstvu. Mat. 79-oy stud. nats. nauch. konf. T. 2.* [Student Science to Agrarian Production. Proc. 79th Student National Sci. Conf. Vol. 2]. Kazan, KGAU Publ., 2021, pp. 225–227. (In Russ.).
- [3] Erokhin M.N., Didmanidze O.N., Parlyuk E.P. et al. [Energy efficiency of the gas engine in agroindustrial complex]. *Chteniya akademika V.N. Boltinskogo* [Readings of Academician V.N. Boltinsky]. Moscow, Megapolis Publ., 2020, pp. 38–50. (In Russ.).
- [4] Khakimov R.T., Ognev O.G. [Use of natural gas as motor fuel for automotive equipment]. *Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologiy nazemnogo transporta* [Innovative Development of Equipment and Technologies of Land Transport.]. Ekaterinburg, Izd-vo UrFU Publ., 2022, pp. 39–41. (In Russ.).
- [5] Gnedova L.A., Gritsenko K.A., Lapushkin N.A. et al. The effectiveness of the gas motor fuel usage in agriculture. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2016, no. 1, pp. 24–33. (In Russ.).
- [6] Keruchenko L.S., Zakharov S.V. [Diesel engine operation under unsteady load]. *Innovatsionnye tekhnologii v APK, kak faktor razvitiya nauki v sovremennykh usloviyakh. Sb. vseros. nauch.-prakt. konf.* [Innovative Technologies in Agroindustrial Complex as a Factor of Science Development in Modern Conditions. Proc. Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Omsk, OmGAU Publ., 2019, pp. 149–152. (In Russ.).
- [7] Zakharov S.V., Keruchenko L.S. [Diesel engine operation under unsteady load]. In: *Katalog nauchnykh i innovatsionnykh razrabotok FGBOU VO Omckiy GAU* [Catalogue of scientific and innovative developments of FGBOU VO Omsk GAU]. Omsk, OmGAU Publ., 2021, pp. 564–568. (In Russ.).
- [8] Kartoshkin A.P., Fomichev A.I., Filimonov V.A. Results of bench tests of mtz-80 tractor with gas cylinder equipment for stability against overturning. *Izvestiya MAAO*, 2022, no. 61, pp. 53–57. (In Russ.).
- [9] Didmanidze O.N., Devyanin S.N., Parlyuk E.P. [What agricultural tractors do Russia need tomorrow?]. *Sovremennye dostizheniya agrarnoy nauki. Nauch. tr. vseros. nauch.-prakt. konf.* [Modern Achievements of Agrarian Science. Proc. Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Kazan, KGAU Publ., 2020, pp. 273–279. (In Russ.).
- [10] Khakimov R.T., Khabushev R.R. et al. Energy efficiency of gas-powered vehicles in the field. *Izvestiya MMAO*, 2021, no. 53, pp. 32–38. (In Russ.).
- [11] Romanyuk V., Likhanov V.A., Lopatin O.P. Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2018, no. 3, pp. 27–32, doi: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-3-027-032> (in Russ.).
- [12] Kartashevich A.N., Malyshkin P.Yu. Improvement of power properties of wheeled tractor when working on mixed diesel-gas fuel. *Agropanorama*, 2020, no. 4, pp. 36–40. (In Russ.).
- [13] Malyshkin P.Yu. [Ensuring the traction characteristics of a wheeled tractor when working on mixed diesel and gas fuel]. *Innovatsionnye resheniya v tekhnologiyakh i mekhanizatsii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva. Vyp. 6* [Innovative Solutions in Technology and Mechanization of Agricultural Production. Iss. 6]. Gorki, BGSKhA Publ., 2021, pp. 220–224. (In Russ.).

- [14] Buzikov Sh.V., Plotnikov S.A., Kozlov I.S. Determination of limiting concentration of rape-seed oil in blended fuel used in diesel engine. *Vestnik transporta Povolzhya*, 2021, no. 1, pp. 72–79. (In Russ.).
- [15] 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.).

Статья поступила в редакцию 03.07.2023

Информация об авторах

МАЛЫШКИН Павел Юрьевич — старший преподаватель кафедры «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства». УО «Белорусская государственная орден Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени 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 орден Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени 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, Head of the Department Tractors, Vehicles and Machines for Environmental Management. Belarusian State Agricultural Academy; Honored Worker of Education of the Republic of Belarus (213410, Mogilev region, Gorki, Republic of Belarus, Michurina St., Bldg. 5, e-mail: kartashevich@yandex.ru).

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

ZABOLOTSKIKH Georgiy Eduardovich — Postgraduate, Department of Mechanical Engineering Technology. Federal Government Budgetary Educational Institution of Higher 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. Исследование тепловыделения в дизеле при работе на газовом топливе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 8, с. 117–125, doi: 10.18698/0536-1044-2023-8-117-125

Please cite this article in English as:

Malyshkin P.Yu., Kartashevich A.N., Plotnikov S.A., Zabolotskikh G.E. Heat release in a diesel engine operating on the gas fuel. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 8, pp. 117–125, doi: 10.18698/0536-1044-2023-8-117-125