

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 623.427.422:621.433

МАЛЫШКИН
Павел Юрьевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА ПРИ РАБОТЕ НА ДИЗЕЛЬНОМ
И ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.05.03 – колесные и гусеничные машины

Могилев 2021

Научная работа выполнена в УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»

Научный руководитель: **Карташевич Анатолий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и машин для природообустройства УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», заслуженный работник образования Республики Беларусь.

Официальные оппоненты: **Карпиевич Юрий Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобилей Белорусского национального технического университета.

Коваленко Николай Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической эксплуатации автомобилей МОУВО «Белорусско-Российский университет».

Оппонирующая организация: **ОАО «Минский тракторный завод».**

Защита состоится «29» октября 2021 г. в 14⁰⁰ на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.18.01 при МОУВО «Белорусско-Российский университет» по адресу: Республика Беларусь, 212000, г. Могилев, пр. Мира, 43, ауд. 323, телефон ученого секретаря +375 222 22 11 93, e-mail: f_av@bru.mogilev.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МОУВО «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан «28» сентября 2021 г.

Ученый секретарь
Совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент

А. С. Мельников

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом парк автотракторной и комбайновой техники растет, увеличивается единичная мощность и расширяется сфера применения машин.

Потребление энергии определяет степень механизации и развитость сельскохозяйственного производства. Стоимость произведенной сельскохозяйственной продукции во многом зависит от количества потребляемой энергии. Часть ее затрачивается на совершение полезной работы, результатом которой является произведенная продукция, а часть рассеивается в окружающем пространстве, в том числе с выбросами токсичных компонентов.

Количество известных и используемых источников энергии на Земле не безгранично, человечество все чаще задумывается о том, что наступит время, когда появится дефицит энергии. Поэтому рациональное, бережное отношение к источникам энергии, увеличение используемой ее полезной доли, а также минимизация выбросов токсичных компонентов в окружающую среду актуально уже сегодня.

Повышение топливной экономичности автотракторной техники можно достичь путем решения задач по улучшению максимальных сцеплений ведущих колес с опорной поверхностью, уменьшению потерь мощности на буксование, повышению топливной экономичности и эффективности работы двигателя и т. д., что, в свою очередь, необходимо тесным образом увязывать с решением задач по улучшению экологических показателей. Перспектива повышения топливной экономичности колесных и гусеничных машин видится в решении задач по улучшению эффективности использования доступных и малоэнергозатратных в производстве видов топлива, таких как газовое, что позволит частично уменьшить расход дизельного топлива, а в итоге снизить себестоимость производимой продукции и повысить рентабельность сельскохозяйственного производства.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами.

Тема и содержание диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденным Советом Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 г. № 585 (раздел 7. Машиностроение. Системы и комплексы сельскохозяйственных машин. Контроль и диагностика в машиностроении). Исследования по диссертационной работе проводились в рамках научной работы по инициативной теме «Улучшение экологических и эксплуатационных показателей колесного трактора путем использования газового топлива» учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (протокол № 3 заседания научно-технического совета УО БГСХА от 09.03.2016 г.) и отвечают следующим нормативным актам:

– Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы» (5. Агропромышленные и продовольственные технологии; 5.5 сельскохозяйственная техника, машины и оборудование);

– Директива Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства»

(«...внедрение инновационных проектов, направленных на использование новых источников энергии и нетрадиционных ресурсов углеводородного сырья...»);

– постановление Совета Министров Республики Беларусь от 10 июня 2015 г. № 483 «Об утверждении перечня государственных программ научных исследований на 2016–2020 годы (программа № 1 «Энергетические системы, процессы и технологии», 2016–2020 годы).

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является обеспечение тяговой характеристики колесного трактора при работе на дизельном и газовом топливе с одновременным снижением дымности отработавших газов и расхода дизельного топлива.

Для достижения данной цели были поставлены следующие *задачи*:

1. Теоретически обосновать и экспериментально оценить изменения тяговых, топливно-экономических показателей колесного трактора при работе на дизельном и газовом топливе.

2. Теоретически исследовать рабочий процесс дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном и газовом топливе, установить зависимости по определению максимальной скорости нарастания давления в цилиндре дизеля трактора и суммарного удельного индикаторного расхода топлива в зависимости от количества подаваемого газового топлива.

3. Установить закономерности между дозировкой подачи газа и эффективными показателями двигателя с целью разработки системы подачи и дозирования газового топлива, обеспечивающей реализацию лучших эксплуатационных показателей колесного трактора.

4. Получить аналитические зависимости, позволяющие определить рациональное размещение места впуска газового топлива, реализующие полученную закономерность между дозировкой подачи газа и эффективными показателями двигателя трактора.

5. Разработать новую систему подачи и дозирования газового топлива; провести стендовые испытания двигателя 4ЧН 11,0/12,5 и натурные испытания колесного трактора тягового класса 1,4, оборудованных разработанной системой.

Объект исследования – колесный трактор.

Предмет исследования – тяговые, топливно-экономические и экологические показатели колесного трактора.

Научная новизна.

1. Теоретически обоснованная тяговая характеристика колесного трактора при работе на дизельном и газовом топливе, позволяющая оценить изменение топливно-экономических показателей на основных видах сельскохозяйственных работ.

2. Аналитические зависимости, позволяющие определить максимальную скорость нарастания давления в цилиндре дизеля и удельный индикаторный расход топлива в зависимости от дозировки газового топлива в цилиндры двигателя.

3. Аналитические зависимости, устанавливающие связь между изменением дозировки подачи газа и эффективными показателями двигателя с учетом режима работы колесного трактора.

4. Аналитическая модель процесса движения воздуха во впускном коллекторе, основанная на теории движения газов. Методика определения рационального места впуска газового топлива в силовую установку колесного трактора.

5. Новизна технических решений подтверждена 2 патентами на изобретения Республики Беларусь, 2 патентами на изобретения Российской Федерации, 7 патентами на полезную модель Республики Беларусь.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований колесного трактора, позволяющие оценить изменения тяговых, топливно-экономических показателей колесного трактора при работе на дизельном и газовом топливе.

2. Аналитические зависимости, позволяющие определить максимальную скорость нарастания давления в цилиндре дизеля трактора и удельный индикаторный расход топлива в зависимости от дозировки газового топлива в цилиндры двигателя.

3. Результаты исследования влияния дозировки подачи газа на эффективные показатели дизеля с учетом режима работы колесного трактора.

4. Аналитическая модель процесса движения воздуха во впускном коллекторе дизеля. Методика определения рационального места впуска газового топлива.

5. Результаты стендовых испытаний дизеля 4ЧН 11,0/12,5 и натурных испытаний колесного трактора тягового класса 1,4, оборудованных разработанной системой подачи и дозирования газового топлива, подтверждающие сохранение тяговых показателей трактора, снижение дымности отработавших газов и расхода дизельного топлива при работе на дизельном и газовом топливе.

Личный вклад соискателя заключается в самостоятельном выполнении теоретических исследований, разработке систем подачи газового топлива в цилиндры двигателя трактора, разработке установок для проведения лабораторных и полевых испытаний, проведении экспериментальных исследований, обработке полученных результатов; разработке, подготовке к изданию патентов и внедрении в учебный процесс учебно-методической литературы. Научный руководитель профессор А. Н. Карташевич оказывал консультационную и практическую помощь на всех этапах выполнения работы.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов.

Основные результаты работы, выносимые на защиту, докладывались и получили одобрение на конференциях: Международной научно-технической конференции молодых ученых в 2011 г. (г. Могилев, БРУ); Международной научно-практической конференции в 2013 г. (г. Киров, ВГСХА); Международной научно-практической конференции «Техника будущего: Перспективы развития сельскохозяйственной техники» в 2013 г. (г. Краснодар, Кубанский ГАУ, ООО «КЛААС»); III Международной научно-практической конференции «Специалист XXI века» в 2014 г. (г. Барановичи); Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы механизации сельскохозяйственного производства» в 2015 г. (г. Горки); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии сельскохозяйственной продукции» в 2015 г. (г. Минск); Международной научно-практической конференции молодых ученых «Научный потенциал молодых ученых для создания инновационных технологий в АПК» в 2015 г. (г. Смоленск); Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса в современных условиях» в 2015 г. (г. Минск); IX Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение» в 2016 г. (г. Киров, ВГСХА); XVI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» в 2016 г. (г. Гомель); III Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты» в 2016 г. (г. Минск, БНТУ); а также на предприятиях АО «Газпром газораспределение Киров» в 2017 г. (г. Кирово-Чепецк Российской Федерации), ОАО

«Новогрудский завод газовой аппаратуры» в 2017 г. (г. Новогрудок), ОАО НПЦ «Гомсельмаш» в 2020 г. (г. Гомель).

Соискатель удостоен стипендии Президента Республики Беларусь (Распоряжение Президента Республики Беларусь от 24 января 2013 г. № 18рп).

Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки инженерных кадров УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», использованы при проведении мероприятий по переводу части автомобильного парка филиала АО «Газпром газораспределение Киров» (г. Кирово-Чепецк, Российская Федерация) для работы на газовом топливе; при разработке газовых систем питания автотракторной техники в ОАО «Новогрудский завод газовой аппаратуры» (г. Новогрудок), ОАО «Гомсельмаш» (г. Гомель).

Опубликование результатов диссертации.

По теме диссертации опубликовано 39 печатных работ объемом 10,68 авторского листа, в том числе 1 монография, 26 научных статей (7 – в изданиях, рекомендованных ВАК Республики Беларусь), 21 публикация в сборниках научных трудов и материалов конференций, 9 патентов Республики Беларусь, 2 патента на изобретения Российской Федерации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем работы составляет 159 страниц, в том числе рисунков – 86, таблиц – 15, приложений – 10. Список использованных источников состоит из 139 наименований.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении проведен анализ эксплуатационных показателей колесных тракторов и их негативных воздействий на окружающую среду, выделены перспективы снижения их вредного влияния, обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследований.

В первой главе диссертации рассмотрены тяговые, технико-экономические показатели колесного трактора, изучены мировые тенденции по использованию газовых топлив для автотракторной техники. Рассмотрены физико-химические свойства газовых топлив. Проведен анализ существующих систем подачи газовых топлив в дизельный двигатель и экспериментальных исследований по применению газовых топлив на дизелях.

Значительный вклад в развитие теории трактора внесли такие ученые, как В. Я. Анилович, И. Б. Барский, Ф. С. Беспялый, Ю. Т. Водолаженко, В. В. Гуськов, А. Н. Карташевич, А. П. Картошкин, В. А. Ким, Г. А. Котиев, И. П. Ксенович, 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, М. G. Bekker и др.

На основании рассмотренных работ выполнен анализ эксплуатационных показателей колесного трактора тягового класса 1,4 «Беларус-922» и теоретические исследования влияния газового топлива на тяговые, топливно-экономические показатели колесного трактора при работе на следующих режимах (рисунок 1):

- 1) 3-й передаче 1-го диапазона с выключенным мультипликатором (3р1н);
- 2) 2-й передаче 1-го диапазона с выключенным мультипликатором (2р1н);
- 3) 3-й передаче 1-го диапазона с включенным мультипликатором (3р1);

4) 2-й передаче 2-го диапазона с выключенным мультипликатором (2р2н).

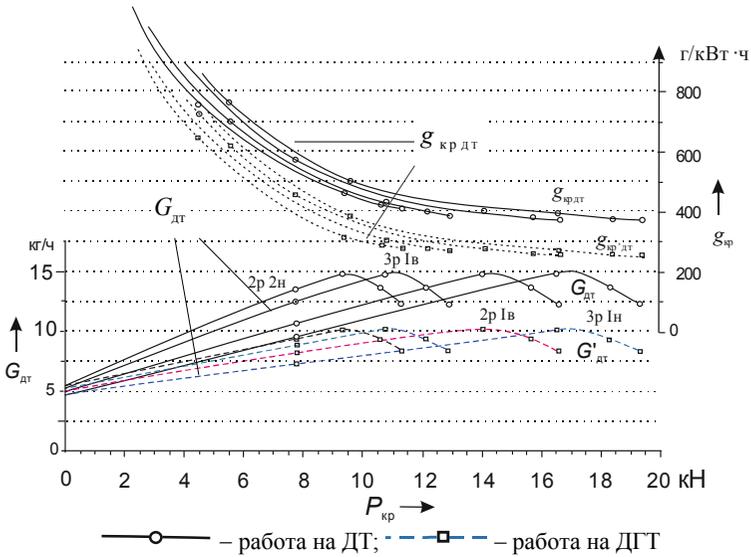


Рисунок 1. – Зависимость часового и удельного расходов дизельного топлива трактором «Беларус-922» в составе МТА на ДГТ от силы тяги на крюке

Изменение химических и физических свойств топлива, закона топливоподачи, мелкости распыливания топлива, распределения концентрации ДТ в факеле, его конфигурации, конструкции топливоподающей аппаратуры и т. д. приводит к изменению крутящего момента двигателя, а следовательно, к изменению технико-экономических качеств МТА.

Однако для сохранения мощности двигателя на уровне, установленном заводом-изготовителем, при работе на дизельном и газовом топливе (ДГТ) с достаточной точностью должно выполняться следующее условие:

$$G_{\Gamma} / G_{\text{дт}} \approx H_{\text{дт}} / H_{\Gamma}, \quad (1)$$

где G_{Γ} – часовой расход газового топлива (ГТ);

$G_{\text{дт}}$ – часовой расход дизельного топлива (ДТ);

$H_{\text{дт}}$ – низшая расчетная теплота сгорания ДТ, $H_{\text{дт}} = 42,5$ МДж/кг;

H_{Γ} – низшая расчетная теплота сгорания ГТ (пропан-бутановой смеси), $H_{\Gamma} = 45,81$ МДж/кг (на 7,8 % выше чем ДТ).

Низшая расчетная теплота сгорания ГТ зависит от состава газа и рассчитывается по формуле

$$H_{\Gamma} = \sum n_i \cdot H_{\text{ни}}, \quad (2)$$

где n_i – i -й компонент смеси;

$H_{\text{ни}}$ – низшая теплота сгорания 1 кг i -го компонента, МДж/кг.

Для поддержания неизменной скорости и крюковой мощности трактора при переводе его на работу с замещением ДТ газовым необходимо уменьшить номинальную цикловую подачу топлива на величину замещения газом путем

перерегулировки топливного насоса высокого давления. Так, в случае замещения ДТ газом в количестве 10, 20, 30, 40 % экономия ДТ с учетом низшей теплоты сгорания не будет превышать 10,7; 21,23; 31,6; 41,81 %.

Нами были проведены натурные испытания трактора «Беларус-922» с трехкорпусным плугом ПЛН-3-35 на ДГТ, состоящем из 70 % ДТ и 30 % ГТ. Двигатель трактора работал на номинальном режиме, при этом тяговое усилие трактора составило 18,29 кН при работе на ДТ и 18,81 кН при работе на ДГТ. Удельный крюковой расход ДТ уменьшился на 31,1 %.

Требования, предъявляемые к уровню токсичности отработавших газов (ОГ) тракторов, постоянно ужесточаются. Совместно с анализом тяговых показателей трактора при его работе на ДГТ также были исследованы его экологические показатели.

При переходе на ДГТ работа трактора сопровождается сохранением тяговых показателей, улучшаются топливно-экономические и экологические показатели. Результаты замеров вредных выбросов в окружающую среду при работе МТА на ДГТ показали возможность снижения дымности отработавших газов на 58 %, содержания диоксида углерода – на 2,6 %.

Во всем мире ведутся исследования возможности применения газовых топлив в дизелях (преимущественно природного газа), отличающихся большим замещением ДТ (70...92 %) и степенью эффективности.

Исследования по применению альтернативных топлив в области двигателестроения проведены многими учеными и отражены в трудах С. А. Абрамова, В. С. Азева, Д. Г. Алексеева, Ю. П. Алейникова, М. С. Ассад, Е. Е. Арсенова, В. И. Балакина, А. К. Болотова, А. Б. Виппера, В. А. Гладких, Г. М. Камфера, С. Р. Лебедева, М. О. Лернера, В. А. Лиханова, В. Льотко, Р. В. Малова, М. Д. Мамедова, В. З. Махова, Н. В. Носенко, С. А. Плотникова, Н. Н. Патрахальцева, В. М. Попова, М. Ю. Ратьковой, А. С. Хачияна и др. Теоретическими исследованиями рабочих процессов в дизелях и разработкой новых видов топлив занимались А. А. Абрамзон, А. А. Гуреев, А. М. Данилов, В. М. Иванов, Г. М. Камфер, А. Н. Карташевич, И. В. Ксенофонтов, В. А. Кудрявцев, Г. М. Кухаренок, В. М. Луканин, А. В. Николаенко, Р. М. Петриченко, С. А. Плотников, П. А. Ребиндер, Ю. Б. Свиридов, Е. С. Семенов, Б. А. Энглин и другие ученые.

Следует отметить, что к настоящему времени проведены значительные теоретические и экспериментальные работы по улучшению эффективных и эксплуатационных показателей тракторов и работы дизелей. В то же время большинство научно-исследовательских работ проводилось только с целью определения возможности работы дизеля на газовых топливах, исследований процесса сгорания либо улучшения эффективных или экологических показателей работы дизелей. Не уделялось должного внимания комплексному рассмотрению вопросов применения дизельного и газового топлива на тракторах. Недостаточно проведено исследований, направленных на разработку новых систем регулирования и подачи газовых топлив, элементов, агрегатов систем регулирования и топливopодачи. Не все работы по улучшению эксплуатационных показателей двигателей колесного трактора завершаются проведением эксплуатационных испытаний.

Все это свидетельствует о том, что улучшение эксплуатационных показателей колесного трактора путем применения дизельного и газового топлива является достаточно актуальной научной задачей.

На основании анализа научной литературы и сравнения результатов теоретических исследований тяговых показателей колесного трактора при работе на ДГТ можно сделать вывод о том, что применение ГТ приводит к улучшению эксплуатационных показателей колесного трактора за счет повышения эффективности работы дизеля и уменьшения количества выбросов вредных веществ в окружающую среду. Однако для получения лучших эксплуатационных показателей колесного трактора требуется установление закономерности между дозировкой подачи ГТ и эффективными показателями двигателя с учетом специфики работы колесного трактора. Данная закономерность может быть положена в основу создания системы подачи и дозирования ГТ в цилиндры силовой установки колесного трактора.

Во второй главе приводятся теоретические исследования свойств ГТ, обосновываются параметры подачи ГТ, описание оригинальной конструкции газовой системы питания для тракторного дизеля и результаты стендовых испытаний на тракторном дизеле 4ЧН 11,0/12,5 при работе на ДГТ.

Анализ теоретических исследований свойств ГТ показал, что газовое топливо, в том числе пропан-бутан, по своим свойствам несколько отличается от ДТ, хотя его, возможно, использовать в тракторах с дизельными двигателями. Однако применение ГТ в виде смеси пропана и бутана для дизеля с наддувом увеличивает максимальную скорость нарастания давления и максимальное давление в цилиндре дизеля. При этом максимальная скорость нарастания давления во второй фазе сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ для автотракторных дизелей с наддувом составляет 0,4...1,0 МПа/град п.к.в.

Учитывая, что состав ГТ многообразен и ГТ обладает свойствами, отличными от свойств ДТ, проведено исследование рабочего процесса дизеля при работе на ДГТ.

Максимальная скорость нарастания давления в цилиндре дизеля на номинальном режиме при работе на ДГТ (МПа/град п.к.в) достаточно точно (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9634$) определяется по эмпирической зависимости

$$dp / d\varphi_{\max \text{ ГТ}} = A_1 \cdot G_{\text{Г}}^3 + A_2 \cdot G_{\text{Г}}^2 - A_3 \cdot G_{\text{Г}} + dp / d\varphi_{\max \text{ ДТ}}, \quad (3)$$

где A_1, A_2, A_3 – эмпирические коэффициенты для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на ДГТ; $A_1 = 14,7$; $A_2 = 0,83$; $A_3 = 0,157$;

$G_{\text{Г}}$ – количество подаваемого газа от расхода ДТ, доли;

$dp/d\varphi_{\max \text{ ДТ}}$ – максимальная скорость нарастания давления (жесткость процесса) при работе дизеля на ДТ, МПа/град п.к.в.

Перспективной задачей двигателестроения является достижение удельного индикаторного расхода топлива для дизелей с наддувом на уровне 160...185 г/кВт·ч. Достичь этого можно повышением индикаторного КПД и теплоты сгорания топлива.

Суммарный удельный индикаторный расход ДГТ g_i при работе дизеля на ДТ и подаче ГТ на номинальном режиме (кг/кВт·ч) ($R^2 = 0,9786$) определяется по эмпирической зависимости

$$g_i = A_1 \cdot G_{\text{Г}}^2 - A_2 \cdot G_{\text{Г}} + g_{i \text{ ДТ}}, \quad (4)$$

где A_1, A_2 – эмпирические коэффициенты для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на ДГТ; $A_1 = 110,16 \cdot 10^{-3}$; $A_2 = 57,915 \cdot 10^{-3}$;

$G_{\text{Г}}$ – количество подаваемого газа от расхода ДТ, доли;

$g_{i \text{ ДТ}}$ – удельный индикаторный расход дизельного топлива, кг/кВт·ч.

При использовании нескольких топлив экономичность действительного цикла оценивается индикаторным КПД η_i и удельным индикаторным расходом ДГТ $g_{i\text{ГТ}}$ по зависимости

$$\eta_i = \frac{Q_i}{Q_1} = \frac{L_i}{H_u \cdot G_{\text{ц}}} = \frac{3600 \cdot 10^3}{\sum H_u \cdot g_i} = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_{\text{удТ}} \cdot g_{i\text{ДТ}} + H_{\text{удГТ}} \cdot g_{i\text{ГТ}}}, \quad (5)$$

где Q_i – количество теплоты, эквивалентное индикаторной работе L_i , Дж;

Q_1 – количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива, Дж;

H_u – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг;

$G_{\text{ц}}$ – расход топлива, кг/ч;

$3600 \cdot 10^3$ – количество теплоты, эквивалентное выполненной работе в 1 кВт за

1 ч;

g_i – удельный индикаторный расход топлива, кг/кВт·ч;

$H_{\text{удТ}}, H_{\text{удГТ}}$ – низшая теплота сгорания дизельного и газового топлива, Дж/кг;

$g_{i\text{ДТ}}, g_{i\text{ГТ}}$ – удельный индикаторный расход дизельного и газового топлива, кг/кВт·ч.

Анализ результатов показал, что по мере увеличения подачи газового топлива суммарный удельный индикаторный расход его уменьшается, это является следствием значительного влияния ГТ на процесс, происходящий в цилиндре дизеля с наддувом.

С целью недопущения превышения максимальной скорости нарастания давления для дизеля с наддувом $(dp/d\phi)_{\text{max}} \leq 1,0 \dots 1,2$ МПа/град п.к.в. предлагается ограничить подачу ГТ в диапазоне 20...30 % от ДТ (рисунок 2) с учетом режима работы колесного трактора.

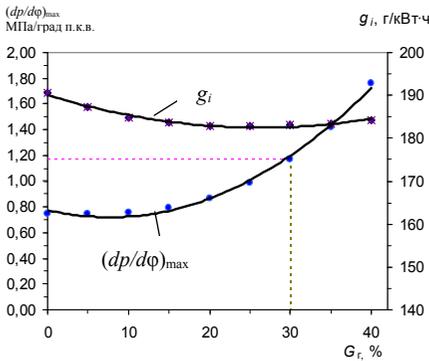


Рисунок 2. – Зависимость максимальной скорости нарастания давления $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ и суммарного удельного индикаторного расхода топлива g_i от количества газа G_r

маятниковой машиной «RAPIDO» (Германия) согласно Правилам ЕЭК ООН № 96.

Вначале определялись оптимальные регулировки системы топливоподачи двигателя, затем снимались нагрузочные и скоростные характеристики с целью определения влияния подачи газового топлива на изменение экологических и экономических показателей тракторного дизеля.

Стендовые испытания тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на ДГТ проводились в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории испытания двигателей внутреннего сгорания и топлив на кафедре тракторов, автомобилей и машин для природообустройства УО БГСХА (регистрационный номер ВУ/112 02.1.0.1609).

Дымность и токсичность ОГ измерялись дымометром «МАНА» MDO 2 LON (Германия) и газоанализатором «МАНА» MGT 5 (Германия). Измерение крутящего момента проводилось на электротормозном стенде SAK-N670 (Германия) с балансирующей

Стендовые испытания тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 показали, что экономия ДТ по внешней скоростной характеристике составляет от 0,43 до 3,56 кг, или 2,7...22,1 %. При этом подача газового топлива составляет от 5 до 22 %. Однако в зависимости от режима работы дизеля наблюдается различная величина изменения эффективных показателей (рисунок 3) и токсичных компонентов при частотах вращения 1400 и 1800 мин⁻¹ (рисунок 4).

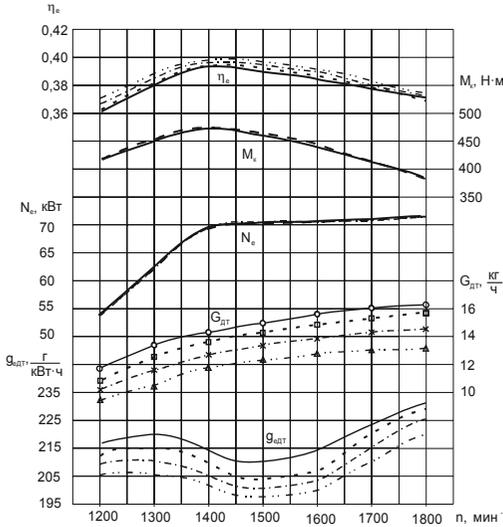


Рисунок 3. – Внешняя скоростная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на ДГТ

- — — — — — дизельное топливо (ДТ)
- - - - - - ДТ + 5% газ
- × - - - - - ДТ + 13% газ
- △ - - - - - ДТ + 22% газ

значительным снижением $C_n H_m$, дымности ОГ на 64,7 % при $n = 1400$ мин⁻¹, а при $n = 1800$ мин⁻¹ – на 51,5 % и незначительным повышением NO_x (на 1...3 %).

Работа дизеля на режимах малых нагрузок и холостого хода при работе на ДГТ сопровождается значительным увеличением выбросов $C_n H_m$ в ОГ и ухудшением топливной экономичности двигателя колесного трактора.

Дальнейшее улучшение топливно-экологических показателей трактора может быть осуществлено за счет изменения количества подаваемого ГТ в зависимости от режима работы двигателя трактора.

С целью улучшения топливно-экологических показателей колесного трактора предложено использовать запатентованную газовую систему подачи ГТ, которая позволит работать дизелю трактора на чистом ДТ при средних и малых нагрузках, а при высоких нагрузках обеспечить подачу ДГТ с концентрацией ГТ (пропан-бутана) до 30 %. Изменение количества подаваемого ГТ в зависимости от режима работы трактора позволит улучшить его эффективные и эксплуатационные показатели.

При анализе рисунка 3 отметим, что при работе на ДГТ эффективная мощность и крутящий момент дизеля остались практически без изменений на уровне заводских значений, а часовой расход ДТ снизился за счет замещения его ГТ. Экономия ДТ по внешней скоростной характеристике составляет от 0,5 до 3,65 кг, или 4,3...22,3 %. При этом подача газового топлива составляет от 5 до 22 %.

Анализ рисунков 3 и 4 показывает, что изменение эффективных и токсичных показателей зависит от режима работы дизеля. При высоких нагрузках увеличение количества ГТ до 22 % сопровождается снижением дымности ОГ с 56 до 20 %.

Существенное изменение экологических показателей при работе на ДГТ наступает при среднем эффективном давлении в цилиндрах дизеля ($P_e > 0,7$ МПа), сопровождающемся

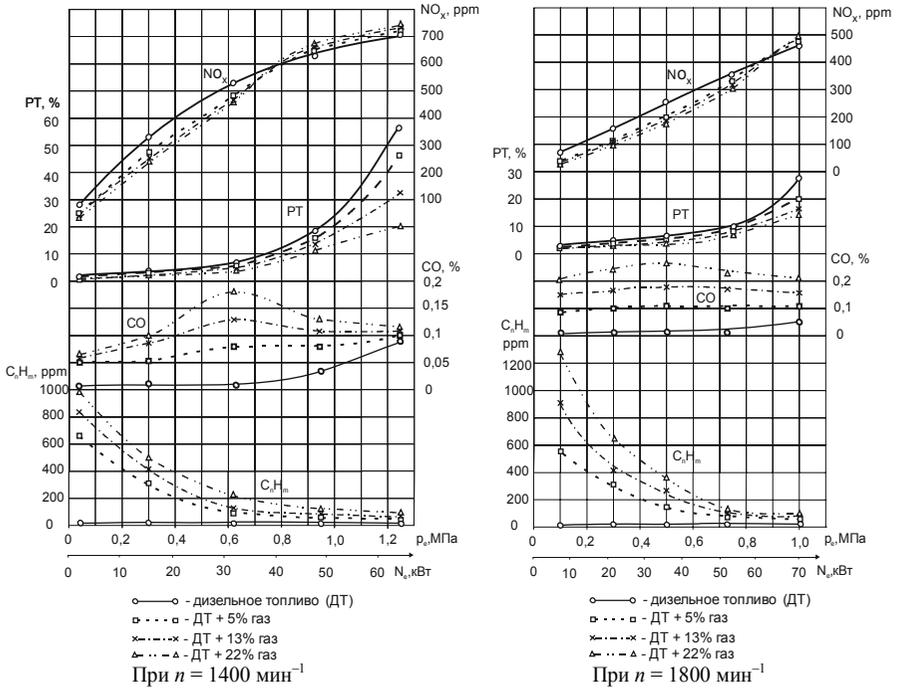


Рисунок 4. – Зависимость изменения токсичных показателей ОГ дизеля 4ЧН 11,0/12,5 от среднего эффективного давления P_e (мощности двигателя N_e)

Необходимость регулирования количества подаваемого ГТ в зависимости от режима работы двигателя трактора связана с изменением коэффициента избытка воздуха, приводящим к снижению температуры стенок камер сгорания и увеличению задержки воспламенения ДГТ, при этом успевают образовываться зоны с переобедненной смесью, не способной гореть, а разбавление таких зон избыточным количеством воздуха приводит к полному прекращению химических реакций ГТ и соответственно к увеличению выбросов C_nH_m .

Расчетным путем установлено, что теплота сгорания рабочей смеси ГТ марки ПБА выше, чем с ДТ, и с увеличением избытка воздуха теплота сгорания рабочей смеси топлива уменьшается. С учетом топливно-экологических показателей нужно стремиться обеспечить работу тракторного дизеля на ДГТ при $\alpha = 1,3 \dots 1,7$, следовательно, подача ГТ в цилиндры тракторного дизеля при $P_e < 0,7 \text{ МПа}$ не должна осуществляться.

Для определения необходимого количества ГТ для рабочего диапазона $P_e = 0,7 \dots 1,0 \text{ МПа}$ тракторного дизеля на номинальной частоте вращения коленчатого вала был реализован полный трехфакторный план эксперимента, по результатам которого были получены уравнения регрессии, описывающие изменение часового расхода ДТ, эффективного КПД и содержания в отработавших газах частиц сажи (рисунки 5, 6, 7) от среднего эффективного давления в цилиндре дизеля, частоты вращения коленчатого вала дизеля и содержания ГТ в ДГТ:

$$G_{\text{дт}} = 0,00247 + 0,0004P_e + 0,00063n - 0,00047G_r + 0,0001P_e \cdot n - 0,00008P_e \cdot G_r + 0,00004n^2 - 0,00012n \cdot G_r + 0,00016G_r^2; \quad (6)$$

$$\eta_e = 0,4 + 0,0069P_e - 0,0040n + 0,0043G_r - 0,0054P_e^2 + 0,0052P_e \cdot G_r - 0,0133111n^2; \quad (7)$$

$$C = 0,0831 + 0,0556P_e - 0,01452n - 0,0346G_r + 0,0187P_e^2 - 0,0316P_e \cdot G_r + 0,0285n^2 + 0,0271G_r^2; \quad (8)$$

где $G_{\text{дт}}$ – часовой расход ДТ, кг/с;

η_e – эффективный КПД силовой установки;

C – содержание в отработавших газах частиц сажи, доли;

P_e – среднее эффективное давление в цилиндре дизеля, Па;

n – частота вращения коленчатого вала дизеля, с^{-1} ;

G_r – содержание ГТ, доли.

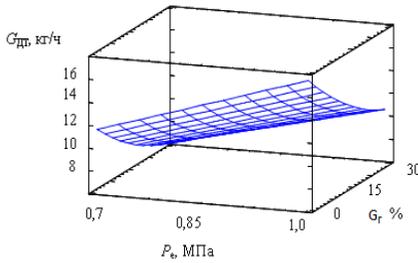


Рисунок 5. – Зависимость расхода дизельного топлива от среднего эффективного давления и расхода газа при номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

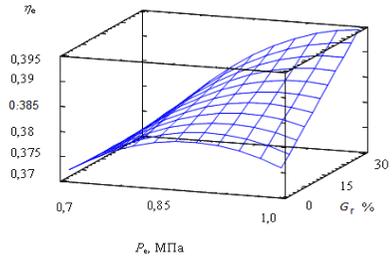


Рисунок 6. – Зависимость эффективного КПД от среднего эффективного давления и расхода газа при номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

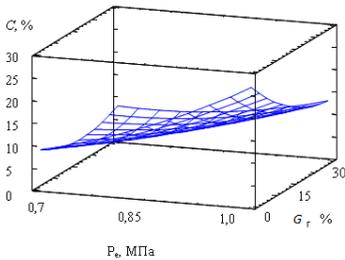


Рисунок 7. – Зависимость содержания сажи в отработавших газах дизеля от среднего эффективного давления и расхода газа при номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

Проверка значимости коэффициентов регрессии по t -критерию Стьюдента и полученных зависимостей по F -критерию Фишера с вероятностью $p = 0,95$ показала, что полученные модели адекватно описывают реальный процесс.

Анализ моделей показывает, что изменение часового расхода ДТ, эффективного КПД и содержания в отработавших газах частиц сажи зависит от режима работы тракторного дизеля. При подаче газа на уровне 15...30 % от ДТ в области эффективной нагрузки 0,8...1,0 МПа при номинальной частоте вращения коленчатого вала происходит увеличение значения эффективного КПД от 0,38 до 0,393, снижение часового расхода ДТ с 16 до 10,9 кг/ч и дымности ОГ в 1,5...2 раза.

Топливную экономичность тракторного дизеля можно оценить по удельному эффективному расходу топлива, но так как ГТ имеет низшую теплоту сгорания выше, чем ДТ, то экономичность силовой установки трактора будем оценивать по эффективному КПД тракторного дизеля.

Для выявления наиболее оптимального количества подаваемого ГТ в зависимости от режима работы тракторного дизеля при работе на ДГТ были проведены испытания по 8-ступенчатому испытательному циклу согласно Правилам ЕЭК ООН № 96. Испытания показали, что использование ДГТ с концентрацией ГТ до 30 % позволяет снизить дымность отработавших газов дизеля на 51,8 %.

Используя экспериментальные данные и полученные модели регрессии, определили базовую характеристику для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на ДГТ с концентрацией ГТ 0...30 % в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки (рисунок 8), для колесного трактора.

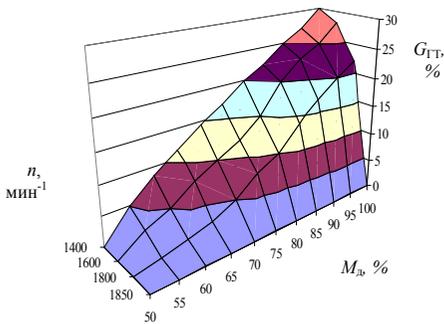


Рисунок 8. – Базовая характеристика подачи ГТ для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки

тавную удельную эффективную расход топлива.

В результате проведенных теоретических исследований дизеля 4ЧН 11,0/12,5 определен и проанализирован момент перекрытия клапанов механизма газораспределения, равный 34° . Рассмотрены параметры, позволяющие судить о пропускной способности клапанов. Определено, что высота подъема клапанов в момент перекрытия не превышает 2,5 мм, величина «время – сечение» в момент перекрытия клапанов равна $0,14374 \text{ мм}^2/\text{с}$ и площадь проходного сечения впускного клапана при высоте подъема 2 мм составляет $188,8 \text{ мм}^2$.

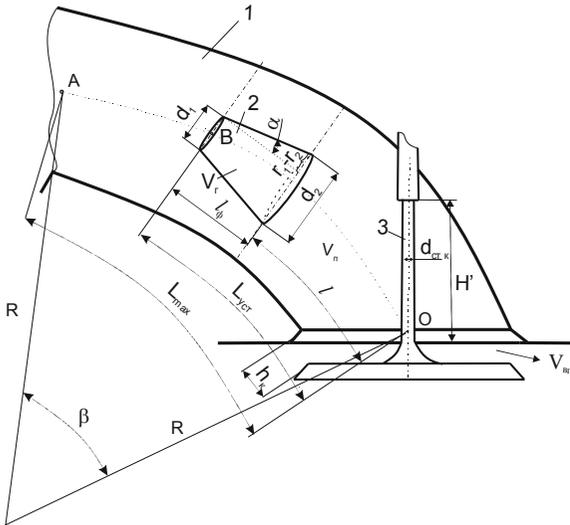
Во время перекрытия клапанов масса продувочного воздуха ($G_{пр}$), прошедшего через каналы впускных клапанов в момент продувки, для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с наддувом с коэффициентом продувки $\varphi_n = 1,08$ и расходе воздуха $G_b = 530 \text{ кг/ч}$ на номинальном режиме ($N_e = 70 \text{ кВт}$, $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$) составляет 40 кг/ч . При этом свежий заряд в виде газозвушной смеси, подаваемой в цилиндры дизеля, в результате продувки частично выводится через выпускные клапаны из цилиндров дизеля и не участвует в дальнейших процессах сжатия и сгорания ДГТ.

С целью исключения потерь газового топлива для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на ДГТ необходимо создать условия, исключающие попадание ГТ в объем воздушного заряда, участвующего в продувке камеры сгорания дизеля. При этом

При снижении нагрузки ниже 50 % и частоты вращения коленчатого вала ниже 1400 мин^{-1} с целью повышения топливной экономичности колесного трактора подача ГТ не осуществляется.

При испытании системы подачи газа на дизеле с наддувом было установлено, что при переходе к высоким нагрузкам существенным становится отклонение коэффициента избытка воздуха в различных цилиндрах от среднего значения. Неравномерное распределение газозвушной смеси существенно увеличивает среднюю эмиссию продуктов неполного сгорания топлива, что приводит к возрастанию

момент и место подачи газового топлива во впускной коллектор имеют важнейшее значение. Для повышения равномерности распределения ГТ по цилиндрам двигателя возникает необходимость в определении места подачи ГТ во впускном коллекторе (рисунок 9).



1 – впускной коллектор дизеля; 2 – факел газового топлива;
3 – впускной клапан.

Рисунок 9. – Расчетная схема для определения места подачи газового топлива во впускной коллектор дизеля

формуле:

$$Q_v(\varphi) = \frac{P}{RT \cdot \rho_k} \cdot f_{\text{кл}}(\varphi) \cdot v_{\text{п}}(\varphi), \quad (10)$$

где P – давление воздуха перед впускным клапаном, Па;
 R – универсальная газовая постоянная для воздуха, Дж/кг·К;
 T – температура воздуха перед впускным клапаном, К;
 ρ_k – плотность заряда на впуске, кг/м³;
 $f_{\text{кл}}$ – текущая площадь проходного сечения клапана, м²;
 $v_{\text{п}}$ – текущая скорость поршня, м/с;
 φ – угол поворота коленчатого вала, рад.

Анализ полученных результатов показывает, что основное влияние на перетекание воздуха из впускного коллектора в выпускной оказывает период от ВМТ до φ_4 (т. е. момент закрытия выпускного клапана).

Объемный расход воздуха через впускной клапан по формуле (10) представим на рисунке 10.

При постоянном давлении топлива P_t скорость движения v_t газового топлива неизменна и количество впрыскиваемого топлива может зависеть от длительности открытия форсунки.

Место, в котором следует подать газовое топливо во впускной коллектор дизеля (точка В, рисунок 9), выражается формулой

$$l_{\phi} + l \leq L_{\text{уст}} \leq L_{\text{max}}, \quad (9)$$

где l_{ϕ} – длина газового факела, м;

l – длина цилиндра патрубков, м;

$L_{\text{уст}}$ – длина впускного коллектора до места подачи ГТ, м;

L_{max} – длина впускного коллектора до разветвления, м (точка А, рисунок 9).

Объемный расход воздуха через клапанную щель впускного клапана (м³) определим по

Длину газового факела (м) определим по формуле:

$$l_{\phi} = \frac{\sqrt[3]{r_1^3 + \frac{3 \cdot (f_c \cdot v_T \cdot \Delta t) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi}} - r_1}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (11)$$

где r_1, r_2 – радиусы соответственно меньшего и большего оснований конуса, м;
 f_c – площадь проходного сечения сопла газовых форсунок, м²;
 v_T – теоретическая скорость движения газового топлива, м/с;
 Δt – длительность подачи топлива, с;
 α – угол наклона образующей, рад.

Впрыск ГТ в диапазоне 12...40 мм (рисунок 11) приводит к увеличению дымности ОГ на 13...32 % и росту количества C_nH_m ОГ на 9,6...38 %, состоящих из ГТ, вследствие перетекания газозвдушной смеси в выпускной коллектор при перекрытии клапанов.

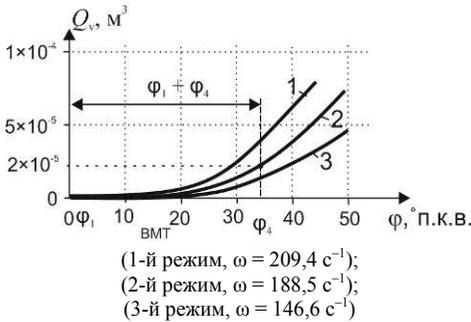


Рисунок 10. – Зависимость объемного расхода воздуха через выпускной клапан от угла поворота коленчатого вала

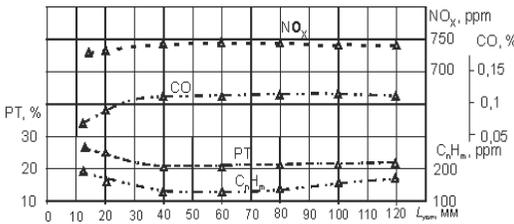


Рисунок 11. – Дымность и токсичность отработавших газов двигателя 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от расстояния до кромки выпускного клапана дизеля

изобретения, полезную модель Республики Беларусь и Российской Федерации.

Наиболее перспективной и наиболее точно удовлетворяющей установленным параметрам по подаче ГТ и размещению на колесном тракторе тягового класса 1,4 является электронная система впрыска газового топлива.

В третьей главе приводятся результаты натурных испытаний трактора «Беларус-922» при работе на ДГТ и разработанной системы подачи ГТ во выпускной

Впрыск ГТ далее 80 мм от кромки впускного клапана приводит к повышению на 3,2...6,2 % дымности ОГ из-за снижения равномерности распределения газа по цилиндрам двигателя трактора и увеличению выброса на 11,6...34,9 % несгоревших углеводородов C_nH_m .

Работа силовой установки трактора при работе на ДГТ с подачей ГТ на расстоянии 40...70 мм до кромки впускного клапана дизеля позволяет исключить перетекание газозвдушной смеси в выпускной коллектор при перекрытии клапанов и тем самым снизить расход ГТ на 8,6 %.

В результате анализа недостатков существующих систем подачи ГТ и с учетом результатов теоретических и экспериментальных исследований был разработан ряд оригинальных систем подачи ГТ, защищенных патентами на

коллектор дизеля (рисунок 12) с трехкорпусным плугом ПЛН-3-35 и комбинированным широкозахватным агрегатом АКШ-3,6-01.



- 1 – газовый баллон; 2 – выносное заправочное устройство; 3 – газовый редуктор;
 4 – датчик температуры отработавших газов; 5 – газовые форсунки; 6 – ТНВД;
 7 – расходомер дизельного топлива ДРТ-5; 8 – датчик температуры охлаждающей жидкости;
 9 – датчик давления во впускном коллекторе дизеля.

Рисунок 12. – Трактор «Беларус-922» с системой подачи газового топлива

Тяговое сопротивление трактора измерялось динамометрической автосцепкой и измерительным усилителем «Spider 8», подключенным к ЭВМ с установленным специализированным программным обеспечением.

Натурные испытания системы подачи газового топлива на тракторе «Беларус-922» показали ее работоспособность в реальных условиях (рисунки 13, 14).

Тяговое усилие трактора с установленной системой подачи газового топлива практически не изменилось. При работе машинно-тракторного агрегата «Беларус-922» + ПЛН-3-35 на ДТ тяговое усилие трактора составило 13,03 кН, при работе на ДГТ – 13,15 кН. При этом погектарный расход ДТ с установленной системой подачи ГТ при работе с плугом снизился с 15,638 до 11,681 кг/га.



Рисунок 13. – Работа МТА «Беларус-922» + ПЛН-3-35 с подачей газового топлива



Рисунок 14. – Работа МТА «Беларус-922» + АКШ-3,6-01 с подачей газового топлива

В результате анализа применения системы подачи ГТ на колесном тракторе отмечено снижение погектарного расхода ДТ на вспашке на 25,31 %, а при работе с АКШ – на 11,38 %.

При работе машинно-тракторного агрегата «Беларус-922» + АКШ-3,6-01 на ДТ тяговое усилие трактора составило 10,74 кН, а при работе на ДГТ – 10,78 кН. При этом

погектарный расход ДТ с установленной системой подачи ГТ при работе с АКШ-3,6-01 снизился с 4,713 до 4,176 кг/га.

Выбросы твердых частиц снизились на 37,39 % на вспашке и на 15,76 % при предпосевной обработке почвы. Однако при применении газовой системы питания произошло увеличение выбросов оксидов азота при работе с плугом на 2,49 %, а при работе с АКШ снизились на 8,75 %.

В четвертой главе приводится методика определения и результаты расчетов экономической эффективности применения системы подачи газового топлива на колесном тракторе «Беларус-922».

Для определения экономической эффективности использования колесного трактора при работе на ДГТ учитывались режимы работы двигателя согласно Правилам ЕЭК ООН № 96.

Годовой экономический эффект от применения ДГТ для колесного трактора «Беларус-922» составит 436,00 руб. (в ценах августа 2021 г.) за счет снижения годового расхода дизельного топлива на 12,9 % и улучшения экологических показателей колесного трактора тягового класса 1,4 при сохранении тяговых показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации.

1. Теоретические исследования колесного трактора показали, что для поддержания неизменной скорости и крюковой мощности трактора при переводе его на работу с замещением ДТ газовым необходимо уменьшить номинальную цикловую подачу топлива на величину замещения газом путем перерегулировки топливного насоса высокого давления. Так, в случае замещения ДТ газовым в количестве 10, 20, 30, 40 % экономия ДТ с учетом низшей теплоты сгорания не будет превышать 10,7; 21,23; 31,6; 41,81 % [8, 14, 21, 27].

Экспериментальные исследования колесного трактора при работе на дизельном и газовом топливе показали сохранение его тяговых показателей с одновременным снижением дымности отработавших газов на 58 % и расхода дизельного топлива на 31,1 %.

2. Теоретические исследования рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном и газовом топливе позволили получить аналитические зависимости с эмпирическими коэффициентами по определению максимальной скорости нарастания давления в цилиндре дизеля трактора и суммарного индикаторного расхода топлива в зависимости от количества подаваемого ГТ. На номинальном режиме работы дизеля при подаче ГТ 0...30 % от ДТ, при этом суммарный удельный индикаторный расхода топлива снижается с 0,191 до 0,183 кг/кВт·ч [2, 8].

3. В результате теоретических исследований получены аналитические зависимости влияния дозировки газового топлива на эффективные показатели дизеля, предложен алгоритм управления подачей газового топлива с учетом среднего эффективного давления и режима работы колесного трактора [8].

При подаче газа на уровне 15...30 % от ДТ в области эффективной нагрузки 0,8...1,0 МПа при номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля происходит увеличение значения эффективного КПД от 0,38 до 0,393, снижение часового расхода ДТ с 16 до 10,9 кг/ч и дымности ОГ в 1,5...2 раза [7].

4. Получены аналитические зависимости, основанные на теории движения газов, которые позволяют установить место подачи газового топлива во впускной коллектор дизеля трактора, оборудованного системой подачи ГТ, и согласовать конструктивные параметры впускной системы и механизма дизеля с параметрами газового факела, расходом воздуха через впускной клапан при перекрытии клапанов, а также определить место подачи ГТ во впускном коллекторе дизеля, исключающее перетекание газозвушной смеси в соседний цилиндр и выпускной коллектор в момент перекрытия клапанов. Представленные расчеты показывают, что подача ГТ для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 должна осуществляться на расстоянии 0,040...0,075 м от кромки впускного клапана через удлинитель газовой форсунки или каналы специально спроектированного коллектора [5, 6].

Проведенный анализ конструктивно-технологических схем систем подачи газовых топлив [1] позволил разработать ряд оригинальных систем подачи газового топлива во впускной коллектор дизеля для автотракторной техники, защищенных патентами на изобретения и полезные модели [4, 29...39].

5. На основе анализа результатов теоретических исследований, стендовых испытаний тракторного дизеля и натурных испытаний колесного трактора на дизельном и газовом топливе разработана система подачи и дозирования газового топлива, обеспечивающая сохранение тяговой характеристики трактора, снижение годового расхода дизельного топлива на 12,9 % за счет точного дозирования газового топлива в зависимости от режима работы дизеля трактора, при снижении дымности ОГ на 51,5...64,7 % при стендовых испытаниях дизеля и на 37,39 и 15,76 % при работе трактора с плугом ПЛН-3-35 и АКШ-3,6-0,1 соответственно [2, 3, 8, 13, 14].

Рекомендации по практическому использованию результатов.

1. Теоретические и экспериментальные результаты работы могут быть использованы при проведении исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию дизелей и тракторов, в научных организациях, предприятиях по производству мобильной техники, работающей на альтернативных газовых топливах.

2. Газовая система питания после некоторых настроек может быть установлена на любой трактор, оборудованный дизельным двигателем. Система автоматически включается в работу и обеспечивает подачу ГТ в зависимости от режима работы дизеля трактора, освобождая оператора машины от необходимости постоянно контролировать его работу. При этом максимальная подача ГТ (марки ПБА) для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 не должна превышать 20...30 % от ДТ.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований доложены, одобрены и приняты к использованию ОАО «Новогрудский завод газовой аппаратуры», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «Вятское машиностроительное предприятие «Авитек» и внедрены в учебный процесс подготовки инженерных кадров по специальности 1-74 06 01 – Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыга, П. Ю. Малышкин, Г. Н. Гурков, А. В. Бучинский. – Горки: БГСХА, 2012. – 376 с.

Статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК

2. Карташевич, А. Н. Влияние подачи газового топлива на экологические показатели дизеля / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Вестн. БГСХА. – 2013. – № 3. – С. 110–116.

3. Карташевич, А. Н. Определение оптимального коэффициента избытка воздуха при работе дизеля на газовом топливе / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Вестн. БГСХА. – 2015. – № 1. – С. 121–126.

4. Малышкин, П. Ю. Системы подачи газового топлива в дизель / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич // Вестн. БГСХА. – 2015. – № 4. – С. 128–136.

5. Малышкин, П. Ю. Определение массы продувочного воздуха дизеля с газотурбинным наддувом и охладителем наддувочного воздуха / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич, С. А. Плотников // Вестн. БГСХА. – 2017. – № 2. – С. 127–131.

6. Метод расчета и проектирования дизеля с наддувом, охладителем наддувочного воздуха с системой подачи газового топлива / А. Н. Карташевич, С. А. Плотников, П. Ю. Малышкин, С. В. Курзенков // Вестн. БРУ. – 2017. – № 3. – С. 35–44.

7. Исследования тракторного дизеля при подаче газа с использованием планирования эксперимента / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич, С. А. Плотников, М. В. Симонов // Вестн. БГСХА. – 2019. – № 2. – С. 239–243.

8. Карташевич, А. Н. Улучшение энергетических свойств колесного трактора при работе на смешанном дизельно-газовом топливе / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Агропанорама. – 2020. – № 4. – С. 36–40.

Статьи в сборниках материалов конференций и журналах

9. Малышкин, П. Ю. Получение и применение биогаза для питания дизелей / П. Ю. Малышкин // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию кафедры тракторов и автомобилей УО БГСХА, Горки, 24–25 сентября 2009 г.; под ред. А. П. Курдеко [и др.]. – Горки, 2009. – С. 69–72.

10. Сысоев, А. А. Сравнение и анализ систем подачи газового топлива в ДВС / А. А. Сысоев, П. Ю. Малышкин // Научный поиск молодежи XXI века: материалы науч. конф. – Горки, 2013. – С. 132–135.

11. Малышкин, П. Ю. Сравнение и анализ систем подачи газового топлива в дизель / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич // Знания молодых: наука, практика и инновации: сб. науч. тр. конф.: в 2 ч. – Киров: ФГБОУ ВПО «Вятская ГСХА», 2013. – Ч. 2: Технические и экономические науки. – С. 41–43.

12. Малышкин, П. Ю. Улучшение экологических показателей дизелей путем применения альтернативных топлив / П. Ю. Малышкин, М. А. Недосеко // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: материалы XXIV межвуз. науч.-практ. конф. – Брянск, 2013. – С. 125–129.

13. Карташевич, А. Н. Исследование эксплуатационных и экологических показателей колесного трактора с подачей газового топлива / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2014. – С. 16–19.

14. Карташевич, А. Н. Исследование влияния системы подачи газового топлива на экологические и технико-экономические показатели колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных работ / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Инновационные технологии в производстве сельскохозяйственной продукции: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2–3 июня 2015 г. / под ред. В. Б. Ловкиса. – Минск: БГАТУ, 2015. – С. 95–101.

15. Карташевич, А. Н. Экологические нормы для дизельной техники и способы их достижения / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Инновационные решения в технологии механизации: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Горки, 2016. – С. 121–123.

16. Малышкин, П. Ю. Улучшение экологических показателей транспортных средств при добавке газового топлива в дизельный двигатель / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич // Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: материалы Междунар. заочной науч.-практ. конф. – Минск: БелНИИТ «Транстехника», 2016. – С. 26–31.

17. Карташевич, А. Н. Исследование работы механизма газораспределения дизеля с наддувом / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Наука – Технология – Ресурсосбережение: сб. науч. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Киров, 2016. – Вып. 17. – С. 124–128.

18. Малышкин, П. Ю. Классификация, сравнение и анализ систем подачи газового топлива для питания дизельных двигателей / П. Ю. Малышкин // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Гомель, 2016. – С. 58–61.

19. Карташевич, А. Н. Исследование эффективности работы дизельного двигателя с подачей сжиженного газа / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Тракторы, автомобили и машины для природообустройства: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию кафедры мелиоративных и строительных машин УО БГСХА; редкол.: А. Н. Карташевич (гл. ред.) [и др.]. – Горки, 2018. – С. 29–32.

20. Малышкин, П. Ю. Воздействие на окружающую среду отработавших газов транспортных средств / П. Ю. Малышкин // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / редкол.: В. Р. Петровец [и др.]. – Горки: БГСХА, 2019. – Вып. 4. – С. 99–103.

21. Малышкин, П. Ю. Оценка особенностей изменения эксплуатационных показателей колесного трактора при использовании газового топлива / П. Ю. Малышкин // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / редкол.: В. Р. Петровец (гл. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2020. – Вып. 5. – С. 142–147.

Тезисы докладов

22. Малышкин, П. Ю. Улучшение экологических показателей дизеля путем применения биогаза / П. Ю. Малышкин // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 22–23 апреля 2010 г.; под ред. И. С. Сазонова [и др.]*. – Могилев, 2010. – С. 42–43.

23. Малышкин, П. Ю. Влияние отработавших газов дизелей на окружающую среду / П. Ю. Малышкин // *Материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых*. – Могилев: БРУ, 2011. – С. 155.

24. Малышкин, П. Ю. Улучшение экологических показателей дизеля путем применения газового топлива / П. Ю. Малышкин, А. А. Сысоев // *Молодежь и инновации – 2013: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых*. – Горки, 2013. – С. 310–311.

25. Малышкин, П. Ю. Влияние газового топлива на экологические показатели дизеля / П. Ю. Малышкин, Д. С. Короленок, А. А. Сысоев // *Техника будущего: перспективы развития сельскохозяйственной техники: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф.* – Краснодар: Кубан. ГАУ, ООО «КЛААС». 2013. – С. 188–189.

26. Малышкин, П. Ю. Улучшение экологических показателей дизелей с турбонаддувом путем применения газового топлива / П. Ю. Малышкин, А. А. Сысоев // *Специалист XXI века: материалы III Междунар. науч.-практ. конф.* – Барановичи, 2014. – С. 184–185.

27. Малышкин, П. Ю. Улучшение эксплуатационных показателей дизелей применением газовых топлив / П. Ю. Малышкин // *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. материалов XXVII Междунар. науч.-тех. конф.* – Брянск, БГСХА. 2014. – № 3 – С. 60–62.

28. Малышкин, П. Ю. Улучшение эксплуатационных показателей дизельных двигателей, оборудованных EGR и DPF / П. Ю. Малышкин // *Новые горизонты – 2016: сб. материалов III Белорусско-Китайского молодеж. инновац. фор.* – Минск, БНТУ, 2016. – С. 148–149.

Патенты

29. Система подачи газового топлива в двигатель внутреннего сгорания на переходных режимах: полезная модель ВУ 8104 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, Д. С. Короленок; дата публ.: 03.01.2012.

30. Система подачи газового топлива в дизель: полезная модель ВУ 8107 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 03.01.2012.

31. Система подачи газового топлива в дизель: полезная модель ВУ 8351 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 03.04.2012.

32. Система подачи газообразного топлива в дизель: полезная модель ВУ 9079 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 17.12.2012.

33. Адаптивная система подачи газового топлива в дизель: полезная модель ВУ 9959 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 15.11.2013.

34. Электронная система впрыска газового топлива в дизель: полезная модель ВУ 10060 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 15.01.2014.

35. Система подачи газового топлива в двигатель внутреннего сгорания на переходных режимах его работы: пат. ВУ 20669 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 28.09.2016.

36. Электронная система подачи газового топлива в двигатель с наддувом и охлаждением наддувочного воздуха: пат. RU 2633337 / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 11.10.2017.

37. Система впрыска газового топлива в двигатель внутреннего сгорания типа дизель: пат. ВУ 21904 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 07.02.2018.

38. Система подачи дополнительного топлива в дизель: пат. RU 2687856 / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 16.05.2019.

39. Система подачи газового топлива в дизель: полезная модель ВУ 12202 / А. Н. Карташевич, В. А. Шапоров, П. Ю. Малышкин; дата публ.: 01.11.2019.

РЭЗІЮМЭ

Мальшкін Павел Юр'евіч

Забеспячэнне цягавай характарыстыкі колавага трактара пры рабоце на дызельным і газавым паліве

Ключавыя словы: колавы трактар, цягавыя паказчыкі, дызель, газавы паліва, сістэма падачы газу, дымнасць.

Мэта працы: забеспячэнне цягавай характарыстыкі колавага трактара пры рабоце на дызельным і газавым паліве з адначасовым зніжэннем дымнасці адпрацаваных газаў і расходу дызельнага паліва.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: тэарэтычныя даследаванні праводзіліся на падставе агульнавядомых матэматычных і фізічных законаў. Эксперыментальныя даследаванні праводзіліся па стандартных метадыках, для даследаванняў была выраблена эксперыментальная ўстаноўка і распрацавана метадыка стэндавых і натуральных выпрабаванняў з выкарыстаннем вымяральнага абсталявання, адпаведнага метадыцы вымярэнняў, дакладнасці, пераліку кантраляваных і вымяраных параметраў, міжнародным патрабаванням.

Атрыманія вынікі і іх навізна. Выкананыя даследаванні дазволілі:

- распрацаваць шэраг арыгінальных сістэм падачы газавога паліва ва ўпускны калектар дызеля для аўтактарнай тэхнікі, абароненых патэнтамі Рэспублікі Беларусь і Расійскай Федэрацыі на вынаходства і карысныя мадэлі;

- распрацаваць метады для вызначэння месца падачы газавога паліва ва ўпускны калектар дызеля з наддувам і ахаладжальнікам наддувачнага паветра з сістэмай падачы газавога паліва, які дазваляе ўзгадніць параметры рухавіка з параметрамі газавога факела, расходам паветра праз упускны клапан пры перакрыцці клапанаў і вызначыць месца падачы газавога паліва ва ўпускным калектары дызеля;

- атрымаць дыферэнцыяльныя ўраўненні, якія дазваляюць вызначыць расход паветра праз рухавік і ўлічыць асноўныя параметры дызеля з наддувам, ахаладжальнікам наддувачнага паветра і сістэмай падачы газавога паліва;

- забяспечыць захаванне цягавых паказчыкаў колавага трактара з адначасовым зніжэннем дымнасці адпрацаваных газаў і расходу дызельнага паліва пры рабоце на дызельным і газавым паліве.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў апрабаваны на айчынных і замежных прадпрыемствах, укаранёны і прымяняюцца для пераводу машынна-трактарнага парку для работы на газавым паліве.

Вобласць прымянення: трактара- і аўтамабілебудаванне.

РЕЗЮМЕ

Малышкин Павел Юрьевич

Обеспечение тяговой характеристики колесного трактора при работе на дизельном и газовом топливе

Ключевые слова: колесный трактор, тяговые показатели, дизель, газовое топливо, система подачи газа, дымность.

Цель работы: обеспечение тяговой характеристики колесного трактора при работе на дизельном и газовом топливе с одновременным снижением дымности отработавших газов и расхода дизельного топлива.

Методы исследования и использованная аппаратура: теоретические исследования проводились на основании общеизвестных математических и физических законов. Экспериментальные исследования проводились по стандартным методикам, для исследований была изготовлена экспериментальная установка и разработана методика стендовых и натурных испытаний с использованием измерительного оборудования, соответствующего методике измерений, точности, перечню контролируемых и измеряемых параметров, международным требованиям.

Полученные результаты и их новизна. Выполненные исследования позволили:

– разработать ряд оригинальных систем подачи газового топлива во впускной коллектор дизеля для автотракторной техники, защищенных патентами Республики Беларусь и Российской Федерации на изобретения и полезные модели;

– разработать метод расчета для определения места подачи газового топлива во впускной коллектор дизеля с наддувом и охладителем наддувочного воздуха с системой подачи газового топлива, позволяющий согласовать параметры двигателя с параметрами газового факела, расходом воздуха через впускной клапан при перекрытии клапанов и определить место подачи ГТ во впускном коллекторе дизеля;

– получить дифференциальные уравнения, позволяющие определить расход воздуха через двигатель и учесть основные параметры дизеля с наддувом, охладителем наддувочного воздуха и системой подачи газового топлива;

– обеспечить сохранение тяговых показателей колесного трактора с одновременным снижением дымности отработавших газов и расхода дизельного топлива при работе на дизельном и газовом топливе.

Рекомендации по использованию: результаты теоретических и экспериментальных исследований апробированы на отечественных и зарубежных предприятиях, внедрены и применяются для перевода машинно-тракторного парка для работы на газовом топливе.

Область применения: тракторо- и автомобилестроение.

SUMMARY

Malyshkin Pavel

Providing traction characteristics of a wheeled tractor when working on diesel and gas fuel

Keywords: wheeled tractor, traction indicators, diesel, gas fuel, gas supply system, smoke content.

Objective of the study: to ensure the traction characteristics of a wheeled tractor when working on diesel and gas fuel with a simultaneous reduction in the smoke content of exhaust gases and diesel fuel consumption.

Research methods and materials: theoretical studies were conducted on the basis of well-known mathematical and physical laws. Experimental studies were carried out according to standard methods, an experimental setup was made for the research and a method of bench and field tests was developed using measuring equipment that corresponds to the measurement method, accuracy, and the list of controlled and measured parameters to international requirements.

Results and their novelty. The performed research allowed:

- to develop a number of original systems for supplying gas fuel to the diesel intake manifold for automotive equipment, protected by patents of the Republic of Belarus and the Russian Federation for the invention and utility model;

- to develop a calculation method for determining the place of supply of gaseous fuel to the intake manifold of a diesel engine with a supercharger and intercooler system gas fuel supply, allowing to define the engine settings gas torch, the air flow through the intake valve during the valve overlap, and to determine the place of supply of GT intake manifold of a diesel engine;

- to obtain differential equations that allow you to determine the air flow through the engine and take into account the main parameters of a supercharged diesel engine, an air cooler and a gas fuel supply system;

- ensure preservation of traction indices of wheeled tractor with simultaneous reduction of fluidity of exhaust gases and consumption of diesel fuel during operation on diesel and gas fuel.

Degree of use: the results of theoretical and experimental studies have been tested at domestic and foreign enterprises, introduced and used to transfer the machine fleet, to work on gas fuel.

Field of application: tractor and automotive industry.

Научное издание

МАЛЫШКИН
Павел Юрьевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА ПРИ РАБОТЕ НА ДИЗЕЛЬНОМ
И ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.05.03 – колесные и гусеничные машины

Подписано в печать 27.09.2021. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,69. Тираж 80 экз. Заказ № 683.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственного образовательного учреждения высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.