

На правах рукописи



**Малышкин Павел Юрьевич**

**Улучшение эффективных и экологических показателей  
автотракторного дизеля путем оптимизации системы  
питания газовым топливом**

2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Горки

2023

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»

Научный руководитель: **Карташевич Анатолий Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор, заслуженный  
работник образования Республики Беларусь

Официальные оппоненты: **Картошкин Александр Петрович**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Автомобили, тракторы и технический  
сервис» Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный аграрный  
университет», г. Санкт-Петербург

**Макаров Владимир Сергеевич**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафед-  
ры «Строительные и дорожные машины» Федераль-  
ное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Нижегородский  
государственный технический университет им. Р.Е.  
Алексеева», г. Нижний Новгород

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Вологодский государственный университет»,  
г. Вологда

Защита диссертации состоится «13» февраля 2024 года в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета У.2.4.7.36 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете Петра Великого по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.spbstu.ru> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат диссертации разослан "28" декабря 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
У.2.4.7.36, д.т.н., доцент



В. В. Барсков

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы.**

В связи с истощением мировых запасов нефти постоянно увеличивается научная и научно-исследовательская работа по применению альтернативных топлив, способных частично или полностью заменить традиционные топлива. В качестве таковых рассматриваются спирты, эфиры, растительные масла и продукты их химической переработки, а также газовые топлива (ГТ). Наиболее приемлемым и доступным, альтернативным ГТ является сжиженный углеводородный газ (СУГ), так как в отличие от других видов топлива он не нуждается в глубокой переработке, широко распространен и доступен для потребителя.

В связи с вышесказанным перспектива улучшения топливной экономичности дизелей видится в эффективном использовании газовых видов топлив в качестве добавки к основному топливу, что в итоге позволяет оказать положительное влияние на рабочий процесс дизеля, его эффективные и экологические показатели.

### **Связь с планами научных исследований.**

Научные исследования, на основе которых подготовлена настоящая диссертация, были выполнены в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии в 2010...2023 годах. Исследования выполнялись в соответствии с планами НИР БГСХА зарегистрированными в Государственном реестре научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ «БелИСА» № 20212591 05.04.2021–12.2023 и договором о научно-техническом сотрудничестве между БГСХА и ВятГУ от 01.04.2015 и 01.01.2018.

### **Цель и задачи исследования.**

Цель работы: Улучшение эффективных и экологических показателей дизеля путем использования системы питания газовым топливом.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Уточнить математические зависимости рабочего процесса дизеля с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, позволяющие проводить расчетные исследования по определению его основных показателей с учетом подачи дизельного и газового топлива.

2. Получить регрессионные зависимости по определению относительного изменения удельного эффективного расхода топлива ( $\Delta g_e$ ), твердых частиц ( $\Delta PM$ ), оксидов азота ( $\Delta NO_x$ ) и суммарной эмиссии в ОГ ( $\Delta SE$ ) от угла опережения впрыска ДТ для дизеля при подаче СУГ.

3. Уточнить метод расчета и проектирования впускной системы дизеля с турбонаддувом, отличающийся согласованием характеристик подачи воздуха и газового топлива с конструктивными параметрами механизма газораспределения.

4. Разработать систему подачи газового топлива с системой автоматического регулирования и управления режимами совместной работы систем подачи дизельного и газового топлива, обеспечивающую уменьшение токсичности продуктов сгорания и экологическую безопасность двигателя.

5. Провести стендовые и натурные испытания двигателя, оснащенного разработанной системой подачи альтернативного газового топлива, провести оценку сравнительных характеристик и критериев процессов, связанных с эксплуатацией,

контролем качества тепловых двигателей, установленных на современных тракторах и выполняющих наиболее энергоемкие процессы сельскохозяйственного производства.

**Научная новизна работы:**

1. Математические зависимости рабочего процесса дизеля с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, позволяющие проводить расчетные исследования по определению его основных показателей с учетом подачи дизельного и газового топлива.

2. Регрессионные зависимости по определению относительного изменения удельного эффективного расхода топлива ( $\Delta g_e$ ), твердых частиц ( $\Delta PM$ ), оксидов азота ( $\Delta NO_x$ ) и суммарной эмиссии в ОГ ( $\Delta SE$ ) от угла опережения впрыска ДТ для дизеля при подаче СУГ на номинальном режиме.

3. Метод расчета и проектирования впускной системы дизеля с турбонаддувом, отличающийся согласованием характеристик подачи воздуха и газового топлива с конструктивными параметрами механизма газораспределения.

4. Система подачи газового топлива с системой автоматического регулирования и управления режимами совместной работы систем подачи дизельного и газового топлива, обеспечивающая уменьшение токсичности продуктов сгорания и экологическую безопасность двигателя.

5. Показатели процесса сгорания, эффективные и экологические показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при добавке СУГ.

Новизна предложенных технических и технологических разработок подтверждена 3 патентами на изобретения Российской Федерации, 2 патентами на изобретения и 7 патентами на полезную модель Республики Беларусь, 1 свидетельством об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Объекты исследований:** дизель 4ЧН 11,0/12,5, трактор «Беларус-922».

**Предмет исследования:** рабочий процесс двигателя, влияние газового топлива на эксплуатационные показатели дизеля.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математические зависимости рабочего процесса дизеля с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, позволяющие проводить расчетные исследования по определению его основных показателей с учетом подачи дизельного и газового топлива.

2. Регрессионные зависимости по определению относительного изменения удельного эффективного расхода топлива ( $\Delta g_e$ ), твердых частиц ( $\Delta PM$ ), оксидов азота ( $\Delta NO_x$ ) и суммарной эмиссии в ОГ ( $\Delta SE$ ) от угла опережения впрыска топлива для дизеля при подаче СУГ на номинальном режиме.

3. Метод расчета и проектирования впускной системы дизеля с турбонаддувом, отличающийся согласованием характеристик подачи воздуха и газового топлива с конструктивными параметрами механизма газораспределения.

4. Система подачи газового топлива с системой автоматического регулирования и управления режимами совместной работы систем подачи дизельного и газового топлива, обеспечивающая уменьшение токсичности продуктов сгорания и экологическую безопасность двигателя.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния добавок газового топлива на рабочий процесс, эффективные и экологические показатели дизеля.

**Квалификационная формула работы.** Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой на основе проведенных исследований изложены положения, квалифицируемые как совокупность новых научно обоснованных технических решений, заключающихся в обосновании и улучшении эксплуатационных показателей автотракторного дизеля добавкой СУГ, подаваемого электронной системой питания во впускной коллектор дизеля.

Предложен новый способ улучшения эффективных и экологических показателей автотракторного дизеля путем применения газовой системы питания. Использование данного способа позволяет влиять на рабочий процесс и тепловыделение в цилиндре двигателя.

Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при совершенствовании рабочего процесса дизелей.

**Практическая ценность.** Результаты проведенных исследований и научно-технические разработки, полученные при проведении исследований, позволяют улучшить эксплуатационные показатели дизеля путем добавки сжиженного углеродного газа в автотракторных дизелях, находящихся в эксплуатации. Полученные данные позволяют снизить затраты времени и средств при проведении дальнейших исследований. Материалы диссертации использованы в учебном процессе УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» и ФБГОУ ВО «Вятский государственный университет». Разработанные технические решения одобрены и приняты к использованию в АО «Газпром газораспределение Киров» (г. Кирово-Чепецк); ОАО «Новогрудский завод газовой аппаратуры» (г. Новогрудок, Республика Беларусь), ОАО «Гомсельмаш» (г. Гомель, Республика Беларусь); ОАО «Вятское машиностроительное предприятие «Авитек» (г. Киров).

**Личный вклад автора.** Автор выполнял работу самостоятельно, играл главную роль в планировании и проведении экспериментов, обобщении полученных результатов, разработке систем подачи газового топлива в цилиндры двигателя, подготовке установок для проведения стендовых и полевых испытаний, проведении экспериментальных исследований, обработке полученных результатов. Им в соавторстве подготовлены и опубликованы материалы диссертационных исследований, а также предложены технические и технологические разработки, защищенные патентами РФ и РБ на изобретения, полезные модели и свидетельством об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Апробация работы.** Основные результаты и материалы диссертации докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Техника будущего: Перспективы развития сельскохозяйственной техники» в 2013 г. (г. Краснодар, Кубанский ГАУ, ООО «КЛААС»); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии сельскохозяйственной продукции» 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 машиностро-

ения, энергетики и управления» в 2016 г. (г. Гомель); III Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты» в 2016 г. (г. Минск, БНТУ); XVIII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» в 2023 г. (г. Барнаул).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 38 печатных работах, в том числе защищены 5 патентами РФ и РБ на изобретения, 7 патентами на полезную модель РБ, 1 монографии и 1 свидетельством об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа содержит введение, пять глав, общие выводы, список литературы. Работа содержит 165 страниц машинописного текста, в том числе 76 рисунков, 30 таблиц. Список литературы включает 205 наименований, в том числе 10 на иностранных языках. Приведены документы, отражающие уровень практического использования результатов исследований, копии патентов, свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ.

### ***ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ***

**Во введении** обоснована актуальность темы улучшения эксплуатационных показателей автотракторного дизеля, сформулированы научная новизна, цель, задачи, практическая ценность работы, основные положения и результаты исследований, выносимых на защиту.

**В первой главе** проведен анализ литературных источников по рассматриваемой проблеме и на его основе обоснованы направления исследований, представлены тенденции использования газовых топлив для улучшения эксплуатационных показателей автотракторных двигателей и рассмотрены физико-химические свойства газовых топлив, влияние газовых топлив на эффективные показатели двигателей, а так же особенности образования токсичных компонентов в дизелях. Проведен анализ существующих систем подачи газовых топлив в дизельный двигатель и экспериментальных исследований по применению газовых топлив на дизелях.

Исследования по применению альтернативных топлив в области двигателестроения проведены многими учеными и отражены в трудах М. С. Ассада, А. К. Болотова, А. Б. Виппера, В. А. Гладких, Г. М. Камфера, С. Р. Лебедева, М. О. Лернера, В. А. Лиханова, В. Лютко, М. Д. Мамедова, С. А. Плотникова, Н. Н. Патрахальцева, В. М. Попова, А. С. Хачияна и др. Теоретическими исследованиями рабочих процессов в дизелях и разработкой новых видов топлив занимались В. М. Иванов, Г. М. Камфер, А. Н. Карташевич, И. В. Ксенофонтов, Г. М. Кухаренок, В. М. Луканин, А. В. Николаенко, Р. М. Петриченко, С. А. Плотников, 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 дизелей. В то же самое время большинство научно-исследовательских работ проводились только с целью определения возможности работы дизеля на газовых топливах, исследований процесса сгорания, либо улучшения эффективных или экологических показателей дизеля. Не уделялось должного внимания комплексному рассмотрению вопросов применения газовых топ-

лив в дизелях. Мало работ, направленных на разработку новых систем регулирования и подачи газовых топлив, элементов и агрегатов систем регулирования и топливоподачи. Не все работы по улучшению показателей ДВС завершаются проведением эксплуатационных испытаний. Все это свидетельствует о том, что улучшение эксплуатационных показателей дизеля путем оптимизации системы питания газовым топливом является актуальной научной задачей.

**Во второй главе** приведены теоретические предпосылки использования ГТ, теоретически обоснован способ подачи газового топлива в дизель с наддувом. Для определения влияния сжиженного нефтяного газа на регулировки, рабочий процесс и тепловыделение тракторного дизеля применялась программа ДИЗЕЛЬ-РК, использующая метод расчета смесеобразования и сгорания профессора Н.Ф. Разлейцева, доработанного А.С. Кулешовым. Модель сгорания в дизеле позволяет исследовать многотопливный двигатель, работающий на смеси ДТ с ГТ в разных пропорциях. Изменяя физические и химические свойства топлив, можно моделировать процесс сгорания. Для определения основных показателей процесса сгорания и анализа изменения эффективных, экономических и экологических при использовании дизельного топлива (ДТ) и добавки газового (85 % ДТ + 15% СУГ и 70 % ДТ+30% СУГ) с учетом конструктивных параметров дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) при изменении угла опережения впрыска топлива и количества СУГ при номинальной частоте вращения коленчатого вала проведено исследование эффективных, экономических и экологических показателей дизеля (рисунок 1).

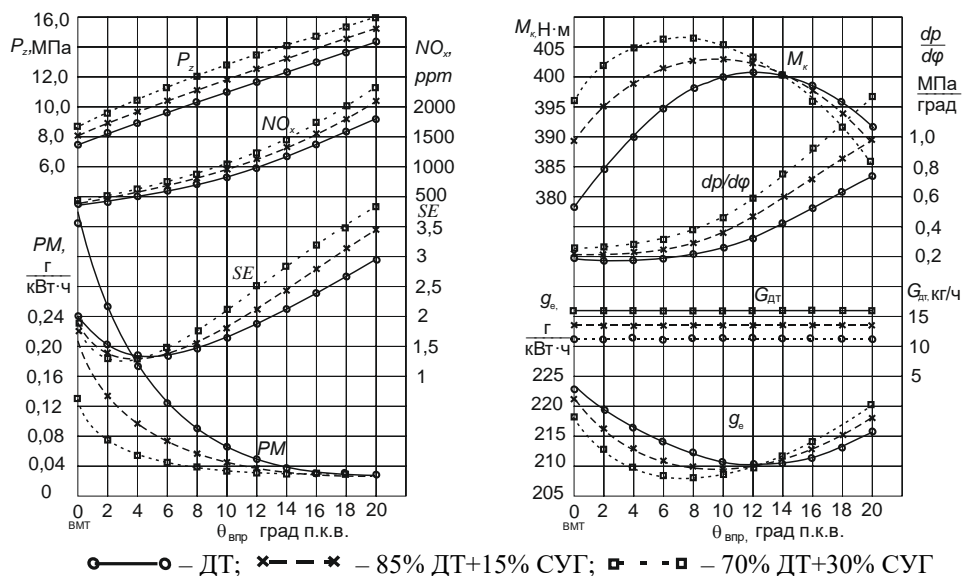


Рисунок 1 – Изменение эффективных, экономических и экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) при изменении угла опережения впрыска топлива и количества СУГ при номинальной частоте вращения коленчатого вала

В результате проделанных расчетов получены зависимости для определения удельного эффективного расхода топлива ( $g_e$ ), твердых частиц ( $PM$ ), оксидов азота ( $NO_x$ ) и суммарной эмиссии ( $SE$ ) для дизеля на номинальном режиме в зависимости от угла опережения впрыска топлива:

$$g_e = 8,37 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_{\text{ДТ}}^2 - 0,00204 \cdot \theta_{\text{ДТ}} + 0,22246, \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}, \quad (1)$$

$$PM = 0,2719 \cdot e^{-0,215 \cdot \theta_{\text{ДТ}}}, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}, \quad (2)$$

$$NO_x = 2,4589 \cdot \theta_{\text{ДТ}}^2 + 22,45 \cdot \theta_{\text{ДТ}} + 348, \text{ ppm}, \quad (3)$$

$$SE = -0,0004 \cdot \theta_{\text{ДТ}}^3 + 0,0211 \cdot \theta_{\text{ДТ}}^2 - 0,2 \cdot \theta_{\text{ДТ}} + 1,6686, \quad (4)$$

где:  $\theta_{\text{ДТ}}$  – угол впрыска ДТ в градусах поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки ( $0 \dots 20^\circ$ ).

Характер относительного изменения удельного эффективного расхода топлива ( $\Delta g_e$ ), твердых частиц ( $\Delta PM$ ), оксидов азота ( $\Delta NO_x$ ) и суммарной эмиссии ( $\Delta SE$ ) от угла опережения впрыска топлива для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 описан следующими зависимостями:

$$\Delta g_e = 0,0396 \cdot \theta^2 - 0,0206 \cdot \theta, \%, \quad (5)$$

$$\Delta PM = 0,0006 \cdot \theta^5 + 0,0145 \cdot \theta^4 - 0,1497 \cdot \theta^3 + 18685 \cdot \theta^2 - 21,797 \cdot \theta + 4,4473, \%, \quad (6)$$

$$\Delta NO_x = 0,2386 \cdot \theta^2 + 8,5148 \cdot \theta + 0,5785, \%, \quad (7)$$

$$\Delta SE = -0,0247 \cdot \theta^3 + 0,4017 \cdot \theta^2 + 8,4 \cdot \theta + 1,4163, \%, \quad (8)$$

где:  $\theta$  – угол опережения впрыска ДТ ( $-15 \dots 0 \dots +15^\circ$ ).

За нулевую точку принят УОВТ обеспечивающий наилучшую топливную экономичность работы дизеля (рисунок 2).

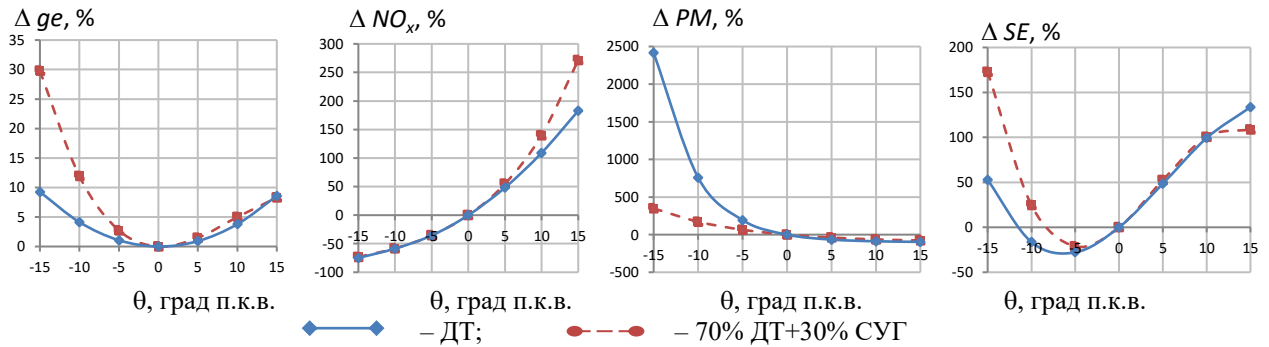


Рисунок 2 – Зависимости относительного изменения эффективных, экономических и экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) при изменении угла опережения впрыска топлива и количества СУГ при частоте  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

Зависимость изменения угла опережения впрыска ДТ с добавкой  $0 \dots 30\%$  СУГ для дизеля представляется в виде прямой, описываемой выражением вида:

$$\theta'_{\text{ДТ}} = -3,33 \cdot G_{\text{Г}} + \theta_{\text{впр}}^{\text{опт}}, \text{ }^\circ. \quad (9)$$

где:  $\theta_{\text{впр}}^{\text{опт}}$  – оптимальный угол опережения впрыска на дизельном топливе, град;

$G_{\text{Г}}$  – количество подаваемого СУГ от расхода ДТ, доли.

Изменения крутящего момента ( $M_{\kappa}$ ), удельного эффективного расхода топлива ( $g_e$ ), максимального давления в цилиндре ( $P_z$ ), скорости нарастания давления по углу поворота коленчатого вала ( $dp/d\phi$ ), твердых частиц ( $PM$ ), оксидов азота ( $NO_x$ ) и суммарной эмиссии ( $SE$ ) от количества подаваемого СУГ для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на номинальном режиме описывается следующими зависимостями:

$$M_{\kappa} = -17,754 \cdot G_{\text{Г}}^2 + 38,968 \cdot G_{\text{Г}} + M_{\kappa \text{ДТ}}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (9)$$

$$g_e = -7,7778 \cdot G_{\text{Г}}^2 - 21,833 \cdot G_{\text{Г}} + g_{e \text{ДТ}}, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}, \quad (10)$$

$$P_z = -3,3333 \cdot G_{\text{Г}}^2 + 5,8333 \cdot G_{\text{Г}} + P_{z \text{ДТ}}, \text{ МПа}, \quad (11)$$

$$dp/d\phi = 0,7778 \cdot G_{\text{Г}}^2 + 0,1967 \cdot G_{\text{Г}} + dp/d\phi_{\text{ДТ}}, \text{ МПа/град}, \quad (12)$$

$$NO_x = 168,67 \cdot G_{\text{Г}}^2 + 176,5 \cdot G_{\text{Г}} + NO_{x \text{ДТ}}, \text{ ppm}, \quad (13)$$



$$PM = 0,3556 \cdot G_r^2 - 0,4667 \cdot G_r + PM_{\text{ДТ}}, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}, \quad (14)$$

$$SE = -1,037 \cdot G_r^2 - 0,3175 \cdot G_r + SE_{\text{ДТ}}, \quad (15)$$

где:  $M_{\text{к ДТ}}$  – крутящий момент при работе двигателя на ДТ, Н×м;

$g_e$  ДТ – удельный эффективный расход топлива при работе двигателя на ДТ, г/кВт·ч;

$P_z$  ДТ – максимальное давление в цилиндре при работе двигателя на ДТ, МПа;

$dp/d\phi$  ДТ – скорость нарастания давления по углу поворота коленчатого вала при работе двигателя на ДТ, МПа/град;

$NO_x$  ДТ – содержание оксидов азота в ОГ при работе двигателя на ДТ, ppm;

$PM$  ДТ – содержание твердых частиц в ОГ при работе двигателя на ДТ, г/кВт·ч;

$SE$  ДТ – суммарная эмиссия  $NO_x + PM$  при работе двигателя на ДТ.

Исследование показателей процесса сгорания и тепловыделения при работе дизеля на ДТ с добавкой СУГ производилось на номинальном режиме в программе ДИЗЕЛЬ-РК. Индикаторная диаграмма (рисунок 3) и характеристики тепловыделения (рисунок 4) строились при определенных ранее оптимальных углах опережения впрыска топлива.

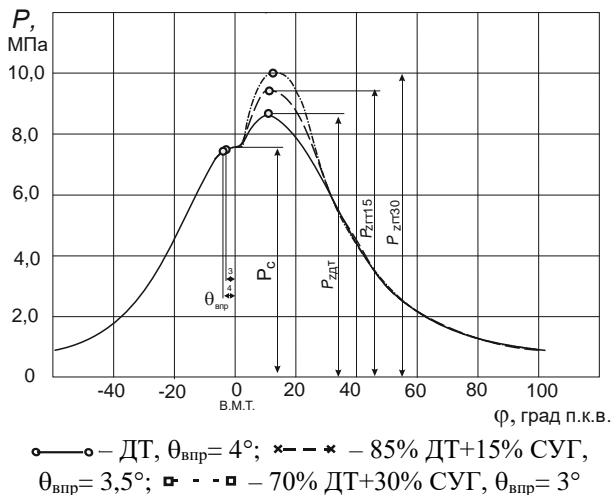


Рисунок 3 – Индикаторная диаграмма дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

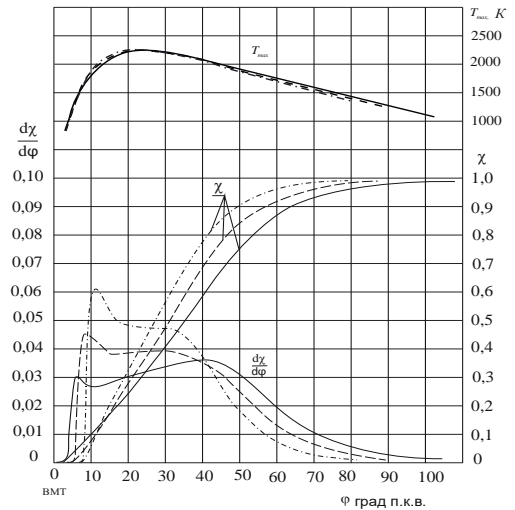


Рисунок 4 – Характеристики тепловыделения дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

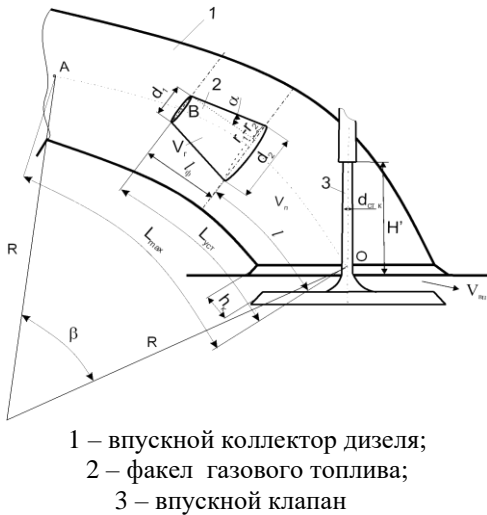
Работа дизеля с добавкой СУГ сопровождалась некоторым увеличением максимального давления цикла  $P_z$ , (при  $\theta_{\text{впр}} = 4^\circ$ ,  $P_{z\text{ДТ}} = 8,68 \text{ МПа}$ , при  $\theta_{\text{впр}} = 3,5^\circ$ ,  $P_{z\text{ДТ}15} = 9,48 \text{ МПа}$ , а при  $\theta_{\text{впр}} = 3^\circ$ ,  $P_{z\text{ДТ}30} = 10,13 \text{ МПа}$ ) и быстрым ростом температуры в зоне сгорания, в то же время максимальные значения  $T_{\text{max}}$  практически не изменяются и достигаются при угле поворота коленчатого вала  $\phi = 13 \dots 38^\circ$ , а к концу сгорания несколько снижаются.

Сравнение кривых выделения теплоты  $\chi$  и динамики использования теплоты  $d\chi/d\phi$  позволяет отметить, что сгорание ДТ с добавкой СУГ начинается позднее, чем ДТ, но проходит быстрее. Однако уже при  $\phi > 40^\circ$  скорость тепловыделения снижается. Увеличение максимальной скорости тепловыделения обусловлено увеличением периода задержки воспламенения, в течение которого впрыскивает-

ся больше количество ДТ, сгорающее впоследствии более интенсивно. Сгорание заканчивается несколько раньше - при  $\varphi = 80 \dots 90^\circ$  против  $\varphi_{\text{ДТ}} = 94 \dots 104^\circ$  на ДТ.

В результате проведенных теоретических исследований дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) определен и проанализирован момент перекрытия клапанов механизма газораспределения, равный  $34^\circ$ . 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  $0,14374 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}$  и площадь проходного сечения впускного клапана при высоте подъема 2 мм составляет  $188,8 \text{ мм}^2$ . Во время перекрытия клапанов масса продувочного воздуха ( $G_{\text{пр}}$ ), прошедшего через каналы впускных клапанов в момент продувки, для дизеля с коэффициентом продувки  $\varphi_{\text{п}} = 1,08$  при расходе воздуха  $G_{\text{в}} = 530 \text{ кг/ч}$ , на номинальном режиме,  $N_e = 70 \text{ кВт}$ , при частоте вращения  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ , составляет 40 кг/ч. При этом свежий заряд в виде газозадушной 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.

С целью исключения потерь газового топлива для многоцилиндровых дизелей при подаче ГТ во впускной коллектор, необходимо создать условия, исключающие попадание ГТ в объем воздушного заряда, участвующего в продувке камеры сгорания. При этом момент и место подачи газового топлива во впускной коллектор имеют важное значение. Для повышения равномерности распределения ГТ по цилиндрам двигателя возникает необходимость в определении места подачи ГТ во впускном коллекторе (рисунок 5). Место, в котором следует подать газ-



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

Рисунок 5 – Расчетная схема для определения места подачи газового топлива во впускной коллектор дизеля

овое топливо  $L_{\text{уст}}$  во впускной коллектор дизеля (точка В, рисунок 5), выражается формулой:

$$l_{\text{ф}} + l \leq L_{\text{уст}} \leq L_{\text{max}}, \quad (16)$$

где:  $l_{\text{ф}}$  – длина газового факела, м;

$l$  – длина цилиндра патрубков, м;

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

$L_{\text{max}}$  – длина впускного коллектора до разветвления, м (точка А, рисунок 5).

Объемный расход воздуха (рисунок 6) через клапанную щель впускного клапана ( $\text{м}^3$ ) определим по формуле:

$$Q_v(\varphi) = \frac{p_1}{RT \cdot \rho_k} \cdot f_{\text{кл}}(\varphi) \cdot v_{\text{п}}(\varphi), \quad (17)$$

где:  $p_1$  – давление воздуха перед впускным клапаном, Па;

$R$  – универсальная газовая постоянная для воздуха, Дж/кг·К;

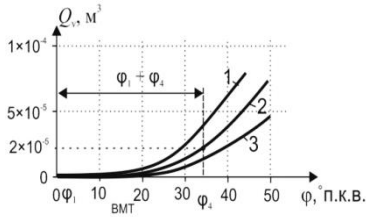
$T$  – температура воздуха перед впускным клапаном, К;

$\rho_k$  – плотность заряда на впуске, кг/м<sup>3</sup>;

$f_{\text{кл}}$  – текущая площадь проходного сечения клапана, м<sup>2</sup>;

$v_{\text{п}}$  – текущая скорость поршня, м/с;

$\varphi$  – угол поворота коленчатого вала, рад.



- (1 – й режим,  $\omega = 209,4 \text{ с}^{-1}$ );  
 (2 – й режим,  $\omega = 188,5 \text{ с}^{-1}$ );  
 (3 – й режим,  $\omega = 146,6 \text{ с}^{-1}$ )

Рисунок 6 – Зависимость объемного расхода воздуха через впускной клапан от угла поворота коленчатого вала

Анализ полученных результатов показывает, что основное влияние на перетекание воздуха из впускного коллектора в выпускной оказывает период от ВМТ до  $\varphi_4$  (т. е. момент закрытия выпускного клапана).

При постоянном давлении топлива  $p_m$  скорость движения  $v_m$  газового топлива неизменна и количество впрыскиваемого топлива может зависеть от длительности открытия форсунки.

Длину газового факела (м) определим по формуле:

$$l_{\varphi} = \frac{\sqrt[3]{r_1^3 + \frac{3 \cdot (f_c \cdot v_t \cdot \Delta t) \cdot \text{tg} \alpha}{\pi}} - r_1}{\text{tg} \alpha}, \quad (18)$$

где:  $r_1, r_2$  – радиусы, соответственно, меньшего и большего основания конуса, м;  
 $f_c$  – площадь проходного сечения сопла газовых форсунок,  $\text{м}^2$ ;  
 $v_t$  – теоретическая скорость движения газового топлива, м/с;  
 $\Delta t$  – длительность подачи топлива, с;  
 $\alpha$  – угол наклона образующей, рад.

Таким образом, положение точки впрыска газового топлива во впускной коллектор дизеля 4ЧН 11,0/12,5 должно осуществляться на расстоянии не менее 0,040 м от кромки впускного клапана.

В результате проделанной работы разработана электронная система впрыска газового топлива для дизеля, оснащенная форсунками и удлинителями, обеспечивающая подачу газового топлива во впускной коллектор перед впускными клапанами для каждого цилиндра индивидуально.

**В третьей главе** изложены методики исследований и разработана экспериментальная установка для проведения стендовых испытаний дизеля Д-245.5S2 при работе на дизельно-газовом топливе (ДГТ), с разработанной электронной системой впрыска ГТ, которые 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 дымомером «МАНА» MDO 2 LON (Германия) и газоанализатором «МАНА» MGT 5 (Германия). Измерение крутящего момента проводилось на электротормозном стенде SAK-N670 (Германия) с балансирующей маятниковой машиной RAPIDO (Германия).

Схема и общий вид экспериментальной установки, размещенной на тормозном стенде с системой подачи ГТ, представлены на рисунке 7 и 8. Для проведения индицирования использовались пьезокварцевый датчик динамического давления PS-01 и датчик ВМТ, соединенные с аналого-цифровым преобразователем NATIONAL INSTRUMENTS cDAQ-9178 и компьютером. Снятие индикаторных диаграмм осуществлялось при оптимальных значениях установочного угла опережения впрыска топлива (УУОВТ), определенных ранее, и постоянных для каждого из скоростных режимов значениях среднего эффективного давления  $p_e$ .

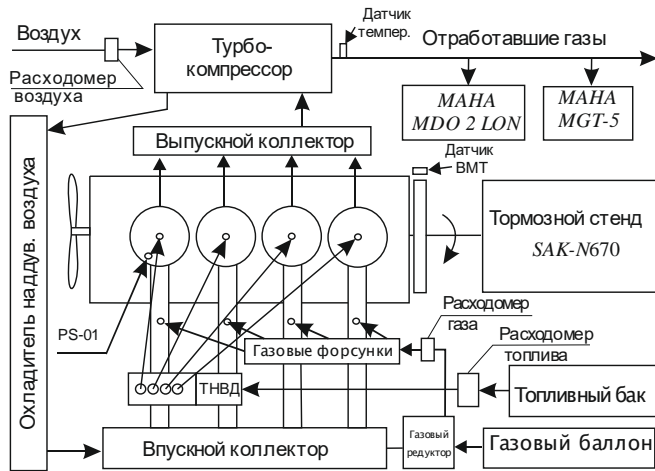


Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки



Рисунок 8 – Экспериментальная установка оснащенная газовой системой питания

С целью исследования работоспособности и эффективности использования разработанной системы подачи ГТ в реальных (полевых) условиях были проведены натурные испытания трактора «Беларус-922», оборудованным разработанной системой подачи газа. Испытания проводились на вспашке (трехкорпусный плуг ПЛН-3-35) и предпосевной обработке (АКШ-3,6-01).

Разработанная экспериментальная установка для проведения стендовых и натурных испытаний позволяла выполнить комплекс исследований рабочего процесса, провести оценку эффективных и экологических показателей дизеля с добавкой газового топлива, а приборы, входящие в состав установки, имели допустимую точность и погрешность измерения.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований, позволяющие провести анализ влияния добавки СУГ на рабочий процесс, регулировки газовой системы, в зависимости от УУОВТ, частоты вращения коленчатого вала и нагрузки (рисунки 9, 10).

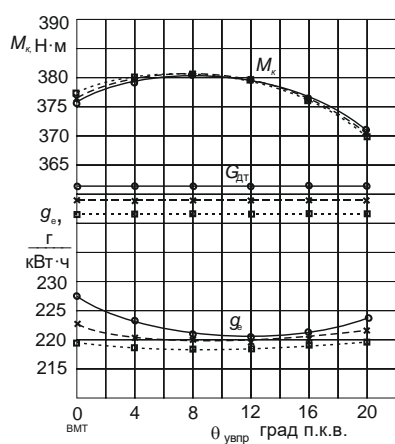


Рисунок 9 – Регулировочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

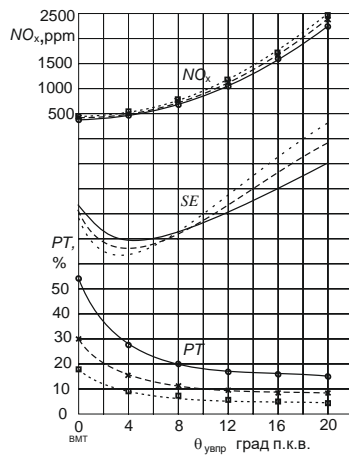
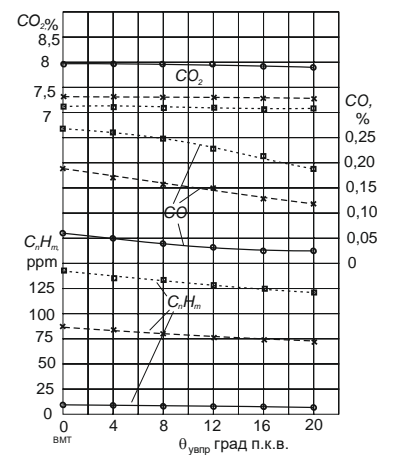


Рисунок 10 – Изменения основных экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по УУОВТ при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$



При добавке 15% СУГ часовой расход дизельного топлива составлял 13,48 кг/ч, а удельный эффективный расход топлива достигал минимального значения  $g_{\text{emin}} = 221,8 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$  при УУОВТ  $\theta_{\text{увр}} = 10,8^\circ$ . Добавление 30% СУГ сни-

жало расход ДТ до 11,06 кг/ч, при этом удельный эффективный расход топлива достигал наименьшего значения  $g_{\text{emin}} = 217,7 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$  при УУОВТ, равном  $10^\circ$ . Работа дизеля с добавкой 40 % СУГ сопровождалась появлением сильного стука, звоном в верхней части блока цилиндров с регистрацией их датчиком удара (*knocks sensor*), поэтому в дальнейшем была признана нецелесообразной.

Содержание оксидов азота в ОГ при добавке СУГ возрастало при увеличении УУОВТ, так при  $\theta_{\text{увпр}} = 4^\circ \text{ NO}_X = 465,7 \text{ ppm}$ , а при  $\theta_{\text{увпр}} = 20^\circ \text{ NO}_X = 2245 \text{ ppm}$ . При добавке 15 % СУГ с увеличением УУОВТ содержание оксидов азота в ОГ несколько изменялось при  $\theta_{\text{увпр}} = 0^\circ$  с 410 до 438 ppm, и при  $\theta_{\text{увпр}} = 20^\circ$  с 2245 до 2347 ppm, т.е. на 6,8...4,5 %. Добавка 30% СУГ значительно увеличивало содержание оксидов азота в ОГ, так при  $\theta_{\text{увпр}} = 0^\circ$  с 410 до 457 ppm, и при  $\theta_{\text{увпр}} = 20^\circ$  с 2245 до 2415 ppm, т.е. на 11,5...7,6 %.

При увеличении УУОВТ дымность ОГ снижалась с 54 до 14,5 % на ДТ, с 29,4 до 8 % и с 17,6 до 4,7 % при добавке 15% и 30% СУГ соответственно. Снижение обусловлено меньшей склонностью СУГ к образованию сажи по сравнению с ДТ.

Суммарная эмиссия сажи и оксидов азота  $SE$  достигала наименьшего значения 1,46 при работе на ДТ с  $\theta_{\text{увпр}} = 4...5^\circ$  и  $SE = 1,28$ ,  $SE = 1,16$  при добавке 15 и 30 % СУГ. В связи с этим следует считать УУОВТ оптимальным для работы на ДТ  $\theta_{\text{увпр}}^{\text{опт}} = 4,0^\circ$ , с добавкой 15 % СУГ  $\theta_{\text{увпр}}^{\text{опт}} = 3,5^\circ$  и с добавкой 30 % СУГ  $\theta_{\text{увпр}}^{\text{опт}} = 3,0^\circ$ .

Концентрация  $C_nH_m$  в ОГ при работе на ДТ имеет тенденцию к уменьшению при увеличении УУОВТ, но изменилось на 2,2 ppm во всем диапазоне установочных углов. Добавка СУГ изменило концентрацию  $C_nH_m$  в ОГ при 15% СУГ (от 85 ppm при  $\theta_{\text{увпр}} = 0^\circ$ , до 72,6 ppm  $\theta_{\text{увпр}} = 20^\circ$ ), 30 % СУГ (от 137 ppm при  $\theta_{\text{увпр}} = 0^\circ$ , до 120 ppm  $\theta_{\text{увпр}} = 20^\circ$ ). Увеличение  $C_nH_m$  в ОГ связано с ускорением процесса горения, появлением переобогащенных зон и последующим пиролизом, а также гашением пламени вблизи сравнительно холодных стенок камеры сгорания.

Исследование показателей процесса сгорания при работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с добавкой СУГ во впускной коллектор (рисунок 11) позволило определить, что работа дизеля сопровождалась увеличением максимального давления  $P_z$ , так при  $\theta_{\text{впр}} = 4^\circ$ ,  $P_{z\text{дт}} = 9,10 \text{ МПа}$ , при  $\theta_{\text{впр}} = 3,5^\circ$ ,  $P_{z\text{гт}15} = 9,81 \text{ МПа}$ , а при  $\theta_{\text{впр}} = 3^\circ$ ,  $P_{z\text{гт}30} = 10,64 \text{ МПа}$  и быстрым ростом температуры в зоне сгорания, в то же время максимальные значения  $T_{\text{max}}$  несколько повышаются, и достигают максимального значения при угле поворота коленчатого вала  $\varphi = 13...20^\circ$ , а к концу сгорания, при  $\varphi = 90^\circ$  снижаются до 1164 К. Увеличение максимальной скорости тепловыделения обусловлено увеличением периода задержки воспламенения, в течение которого впрыскивается больше ДТ и впоследствии сгорает более интенсивно,  $\varphi = 85...90^\circ$  против  $\varphi_{\text{дт}} = 100^\circ$  на ДТ.

При номинальной частоте вращения  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на ДТ максимальная скорость нарастания давления составляет 0,203 МПа/град, а при содержании ГТ 15 % и 30 % она равна, соответственно, 0,248 и 0,332 МПа/град, т.е. увеличение количества ГТ ведет к повышению жесткости рабочего процесса.

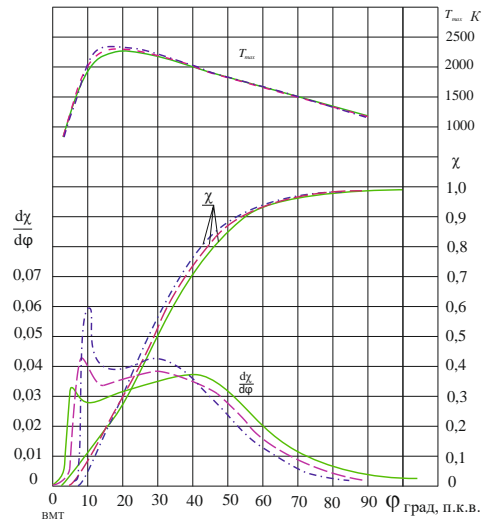
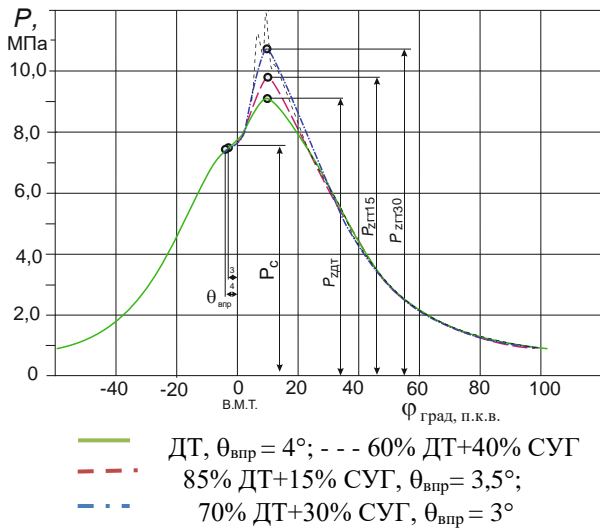


Рисунок 11 – Индикаторная диаграмма и характеристики тепловыделения дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

Экономия ДТ по внешней скоростной характеристике составила от 0,43 до 3,56 кг/ч (рисунок 12) или 2,7...22,1 %. При этом подача газового топлива составляет от 5 до 22 %. Однако в зависимости от режима работы дизеля наблюдается изменение эффективных и экологических показателей (рисунок 13).

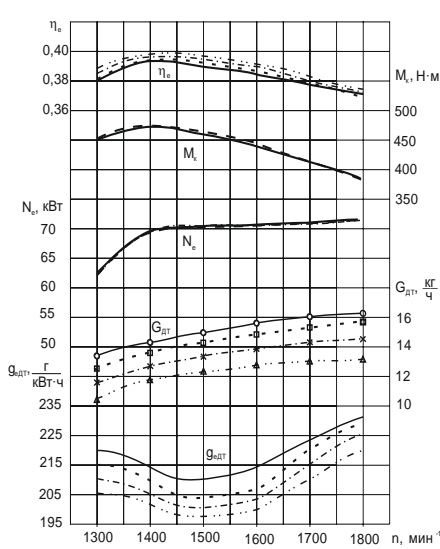
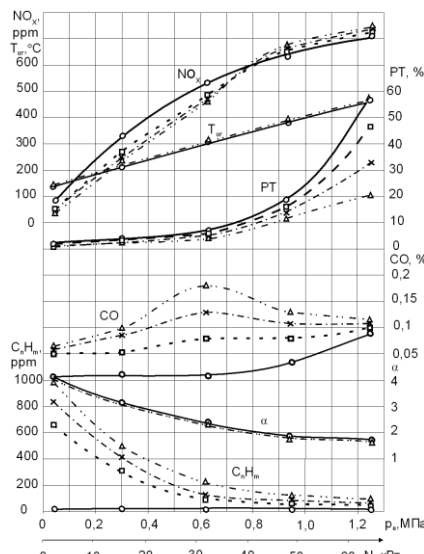
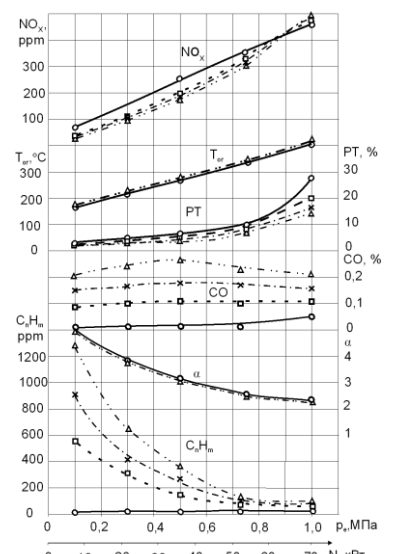


Рисунок 12 – Внешняя скоростная характеристика дизеля Д-245.5S2 при работе на ДГТ



а – при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$



б – при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

Рисунок 13 – Зависимость изменения токсичных показателей ОГ дизеля Д-245.5S2 от среднего эффективного давления  $p_e$

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 ( $p_e$ ) в цилиндре дизеля более 0,7 МПа, сопровождающимся значительным снижением  $C_nH_m$ , дымности ОГ – на 51,5...64,7 % и незначительным повышением  $\text{NO}_x$  (на 1...3 %). Работа дизеля на режимах малых нагрузок и холостого хода при работе на ДГТ сопровождается увеличением выбросов  $C_nH_m$  с 2 ppm до 1380 ppm в ОГ и ухудшением топливной экономичности дизеля. Дальнейшее улучшение топливно-



экологических показателей двигателя может быть осуществлено с применением планирования эксперимента. В качестве критериев оптимизации были приняты, исходя из организации рабочего процесса, соответственно: часовой расход ДТ  $G_{\text{дт}}$ , (0,0016...0,0039 кг/с); эффективный КПД  $\eta_e$  (0,3698...0,41), содержание сажи  $C$  (0,065...0,233) в ОГ дизеля. В результате были получены объемные поверхности отклика (рисунок 14) и математические уравнения регрессии второго порядка:

$$\eta_e = 0,397129 + 0,0060875 \cdot P_e - 0,00395 \cdot n + 0,0052625 \cdot G_{\text{Г}} + 0,006475 \cdot P_e \cdot G_{\text{Г}} - 0,0122036 \cdot n^2, \quad (19)$$

$$G_{\text{дт}} = 0,0025 + 0,0004125 \cdot P_e + 0,000625 \cdot n - 0,0004625 \cdot G_{\text{Г}} + 0,0001 \cdot P_e \cdot n - 0,000075 \cdot P_e \cdot G_{\text{Г}} - 0,0001 \cdot n \cdot G_{\text{Г}} + 0,0001625 \cdot G_{\text{Г}}^2, \quad (20)$$

$$C = 0,101885 + 0,04725 \cdot P_e - 0,0123125 \cdot n - 0,0288125 \cdot G_{\text{Г}} - 0,0235 \cdot P_e \cdot G_{\text{Г}} + 0,0187019 \cdot n^2 + 0,0192019 \cdot G_{\text{Г}}^2. \quad (21)$$

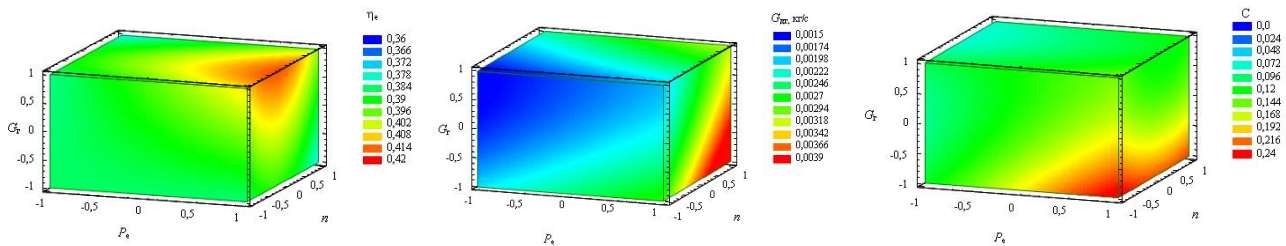


Рисунок 14 – Объемные поверхности отклика эффективного КПД дизеля  $\eta_e$ , расхода дизельного топлива  $G_{\text{дт}}$ , содержание сажи ( $C$ ) в ОГ дизеля

Максимальное значение  $\eta_e$  составляет 0,41 при значении  $P_e = 1,0 \cdot 10^6$  Па;  $G_{\text{Г}} = 0,30$  и  $n = 24,2$  с<sup>-1</sup>, минимальное значение  $G_{\text{дт}}$  составляет 0,0014 кг/с, при значении  $P_e = 0,7 \cdot 10^6$  Па,  $G_{\text{Г}} = 0,282$  и  $n = 20$  с<sup>-1</sup> и минимальное значение содержания сажи  $C$  в ОГ дизеля составляет 0,052 при значении  $P_e = 0,7 \cdot 10^6$  Па,  $G_{\text{Г}} = 0,171$  и  $n = 26,6$  с<sup>-1</sup>.

Проведя комплексную оптимизацию по критерию  $D\text{-optium} \rightarrow 1,0$  с учетом выше полученных зависимостей (19...21) при условии

$$\left. \begin{array}{l} \eta_e \rightarrow \max \\ G_{\text{дт}} \rightarrow \min \\ C \rightarrow \min \end{array} \right\} \quad (22)$$

получено максимальное значение  $D\text{-optium} = 0,8$  (рисунок 15) при  $P_e = 0,88 \cdot 10^6$  Па,  $n = 23,4$  с<sup>-1</sup>,  $G_{\text{Г}} = 0,30$ .

При испытании электронной системы подачи газа на дизеле с наддувом установлено, что при переходе к высоким нагрузкам существенным становится отклонение коэффициента избытка воздуха в различных цилиндрах от среднего значения. Неравномерное распределение газо-воздушной смеси существенно увеличивает среднюю эмиссию продуктов неполного сгорания топлива, что приводит к возрастанию удельного эффективного расхода топлива. Впрыск СУГ в диапазоне 12...40 мм (рисунок 16), приводит к увеличению дымности ОГ на 13...32 % и росту количества  $C_nH_m$  ОГ на 9,6...38 %, преимущественно, вследствие перетекания газозвушной смеси в выпускной коллектор при перекрытии клапанов.

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 и увеличению выброса на 11,6...34,9 % несгоревших углеводородов ( $C_nH_m$ ).

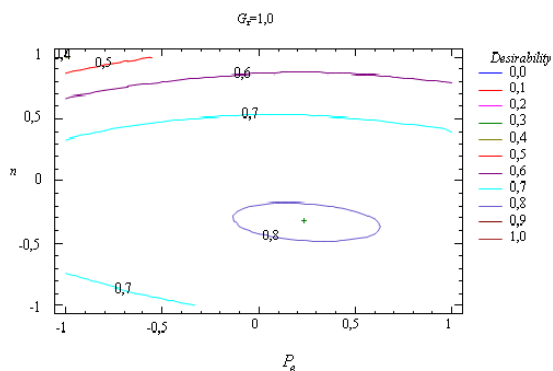


Рисунок 15 – Графическая интерпретация контуров расчетной поверхности отклика комплексной оптимизации по критерию *D-optium*

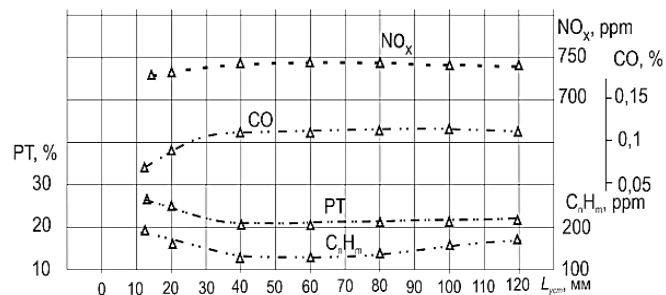


Рисунок 16 – Токсичность отработавших газов дизеля Д-245.5S2 в зависимости от расстояния до кромки впускного клапана дизеля

Проведенные натурные испытания разработанной газовой системы питания, смонтированной на тракторе «Беларус-922» показали, что работа машинно-тракторного агрегата с плугом ПЛН-3-35 сопровождалась снижением часового расхода дизельного топлива с 14,3...14,7 до 11,2..11,4 кг/ч, и дымности ОГ на 39,3 %, с небольшим повышением оксидов азота на 2,6 %. а при работе с АКШ-3,6-01 часовой расход ДТ снизился с 12,3 до 10,90 кг/ч, т.е. на 11,4 %. а так же, произошло снижение дымности ОГ на 16,5 % и оксидов азота – на 9,3 %.

Представленные данные свидетельствуют о том, что основные показатели дизеля на тракторе в составе МТА не сильно отличаются от стендовых, а используемая газовая система показала достаточно эффективную работу в реальных условиях эксплуатации.

**В пятой главе** проведен расчет экономической эффективности применения СУГ для питания дизеля. Применение СУГ позволяет снизить расход ДТ на 22 % и затраты на 107,97 руб/ч. Суммарный годовой эффект от применения ДТГ составил 131576,36 руб, из которых экологический эффект 31220 руб, а экономический эффект – 100352,36 руб на 1000 мото×ч работы дизеля.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Получены уточненные математические зависимости рабочего процесса дизеля с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, позволяющие проводить расчетные исследования по изменению крутящего момента, удельного эффективного расхода топлива, максимального давления в цилиндре, жесткости рабочего процесса, содержания твердых частиц, оксидов азота и суммарной эмиссии в отработавших газах от количества подаваемого СУГ для дизеля на номинальном режиме. Получена зависимость изменения угла опережения впрыска ДТ с добавкой 0...30% СУГ для дизеля на номинальном режиме.

2. Получены регрессионные зависимости по определению относительного изменения удельного эффективного расхода топлива ( $\Delta g_e$ ), твердых частиц ( $\Delta PM$ ), оксидов азота ( $\Delta NO_x$ ) и суммарной эмиссии в ОГ ( $\Delta SE$ ) от угла опережения впрыска топлива для дизеля при подаче СУГ на номинальном режиме. Установлено, что работа дизеля с добавкой до 30% СУГ позволяет снизить суммарную эмиссию твердых частиц и оксидов азота в ОГ дизеля на 20,2 %, при сохранении



основных эффективных показателей работы на уровне серийного дизеля, работающего на ДТ.

3. Уточнен метод расчета и проектирования впускной системы дизеля с турбонаддувом, отличающийся согласованием характеристик подачи воздуха и газового топлива с конструктивными параметрами механизма газораспределения. Полученные аналитические зависимости, основанные на теории движения газов, позволяют установить место подачи газового топлива во впускной коллектор дизеля, оборудованного системой подачи ГТ, и определить место подачи ГТ во впускном коллекторе дизеля, исключая перетекание газоздушнoй смеси в соседний цилиндр и выпускной коллектор в момент перекрытия клапанов. Теоретически обосновано оптимальное положение точки впрыска газового топлива во впускной коллектор дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на расстоянии не менее 40 мм от кромки впускного клапана, обеспечивающее лучшие экологические показатели.

4. Разработаны оригинальные системы подачи газового топлива с автоматическим регулированием и управлением режимами совместной работы систем подачи дизельного и газового топлива, обеспечивающие уменьшение токсичности продуктов сгорания дизеля, повышение точности дозирования газового топлива, эффективности, безопасности работы дизеля и защищенные патентами Российской Федерации и Республики Беларусь. Разработана система питания дизеля газовым топливом (пат. РФ № 2633337) с эксплуатационными характеристиками, приближенными к оптимальным значениям.

5. Проведенные стендовые испытания двигателя оснащенного разработанной системой подачи альтернативного газового топлива позволили установить, что для получения лучших характеристик при добавлении СУГ во впускной коллектор дизеля 4ЧН 11,0/12,5 необходимо ограничить подачу СУГ на уровне 30 % от ДТ. Оптимальным УУОВТ дизеля (Д-245.5S2) для работы на ДТ является  $\theta_{\text{увпр}}^{\text{опт}} = 4^\circ$ , с добавкой 15 % СУГ  $\theta_{\text{увпр}}^{\text{опт}} = 3,5^\circ$  и с добавкой 30 % СУГ  $\theta_{\text{увпр}}^{\text{опт}} = 3,0^\circ$ . Установлено, что работа дизеля с добавкой СУГ сопровождается некоторым увеличением максимального давления  $P_z$ , на 7,8 % и 16,9 % при добавке 15 % и 30% СУГ, соответственно.

Установлено, что подачу газового топлива во впускной коллектор дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2), в количестве 20...30 % от ДТ наиболее целесообразно обеспечить в области эффективной нагрузки дизеля 0,8...1,0 МПа при частотах вращения 1400...1750 мин<sup>-1</sup>.

Экспериментально подтверждено оптимальное положение точки впрыска ГТ во впускной коллектор дизеля 4ЧН 11,0/12,5, находящееся на расстоянии 40...80 мм от кромки впускного клапана, обеспечивающее наилучшие экологические показатели.

Натурные испытания газовой системы питания, смонтированной на колесном тракторе «Беларус-922», показали работоспособность системы в реальных условиях. Установлено, что часовой расход ДТ снижается с 14,3...14,7 до 11,2...11,4 кг/ч, за счет замещения его газовым. Погектарный расход ДТ топлива при работе с добавкой СУГ уменьшился при работе с плугом ПЛН-3-35 на 25,3 %, (с 15,64 до 11,69 кг/га), дымность ОГ дизеля трактора снизилась на 39,3 %. При работе с АКШ-3,6-01 погектарный расход ДТ при работе с добавкой СУГ умень-

шился – на 11,3 %, (с 4,71 до 4,18 кг/га), дымность ОГ снизилась на 16,5 %, содержание оксидов азота в ОГ уменьшилось на 9,3 %.

6. Применение СУГ, как добавки для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на номинальном режиме, позволяет снизить расход ДТ на 22 % и затраты на 107,97 руб/ч. Суммарный годовой эффект от применения ДГТ составил 131576,36 руб, из которых экологический эффект 31224 руб, и экономический эффект – 100352,36 руб на 1000 мото×ч работы дизеля.

#### **Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК**

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

2. Исследование тепловыделения в дизеле при работе на газовом топливе / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич, С. А. Плотников, Г.Э. Заболотских // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 8. – С. 117-125.

#### **Статьи, индексируемые РИНЦ**

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

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

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

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

7. 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 // Вестник БРУ. – 2017. – № 3. – С. 35-44.

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.

9. Малышкин, П. Ю. Теоретические и экспериментальные исследования рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при использовании дизельно-газового топлива / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич // Вестник БРУ. – 2021. – № 1. – С. 23-30.

10. Малышкин, П. Ю. Оптимизация подачи газового топлива для тракторного дизеля / П. Ю. Малышкин // Вестник БГСХА. – 2022. – № 4. – С. 168-172.

11. Малышкин, П. Ю. Оценка экологической и экономической эффективности применения газового топлива для питания дизелей / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич // Вестник БГСХА. – 2023. – № 2. – С. 185-189.

#### **Патенты, авторские свидетельства**

13. Система подачи газового топлива в дизель: полез. модель ВУ 8107 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин. – Оpubл. 03.01.2012.

14. Система подачи газового топлива в дизель: полез. модель ВУ 8351 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин. – Оpubл. 03.04.2012.

15. Система подачи газообразного топлива в дизель: полез. модель ВУ 9079 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин. – Оpubл. 17.12.2012.

16. Адаптивная система подачи газового топлива в дизель: полез. модель ВУ 9959 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин. – Оpubл. 15.11.2013.

17. Электронная система впрыска газового топлива в дизель: полез. модель ВУ 10060 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин. – Оpubл. 15.01.2014.

18. Система подачи газового топлива в двигатель внутреннего сгорания на переходных режимах его работы: пат. ВУ 20669 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, – Оpubл. 28.09.2016.

19. 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. – Оpubл. 11.10.2017.

20. Система впрыска газового топлива в двигатель внутреннего сгорания типа дизель: пат. ВУ 21904 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин. – Оpubл. 07.02.2018.

21. Система подачи дополнительного топлива в дизель: пат. RU 2687856 / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин. – Оpubл. 16.05.2019.

22. Система подачи газового топлива в дизель: полез. модель ВУ 12202 / А. Н. Карташевич, В. А. Шапорев, П. Ю. Малышкин. – Оpubл. 01.11.2019.

23. Способ получения многокомпонентной биотопливной композиции: пат. RU 2743350 / С.А.Плотников, А.И. Шипин, А.Н. Карташевич, П.Ю. Малышкин. – Оpubл. 17.02.2021.

24. Плотников С.А., Ланских Ю.В., Подгорный В.А., Зубакин А.С., Малышкин П.Ю. Расчет экономической эффективности использования генераторного газа в ДВС («РЭЭИГГ-ДВС») // Свидетельство об офиц. регистр. прогр. для ЭВМ № 2018618558 от 16.07.2018.

#### Монографии

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

#### Статьи в сборниках материалов конференций

26. 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. статей Междунар. науч.- практ. конф. – Краснодар: Кубанский ГАУ, ООО «КЛААС». 2013. – С. 188-189.

27. 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.: Технические и экономические науки. – Киров: Вятская ГСХА, 2013. – Ч.2. – С. 41-44.

28. 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. научн. тр. Междунар. науч.-технич. конф. – СПб: СПбГЭУ, 2014. – С. 16-19.

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

30. Малышкин, П. Ю. Улучшение эксплуатационных показателей дизелей с применением газовых топлив / П. Ю. Малышкин // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. материалов XXIV межвуз. науч.-практ. конф. – Брянск, 2014. – № 3 – С. 60-62.

31. 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. научн. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, БГАТУ, 2015. – С. 95-101.

32. Малышкин, П. Ю. Влияние газового топлива на экологические показатели тракторного дизеля с турбонаддувом / П. Ю. Малышкин // Новые горизонты – 2016: сб. материалов III Белорусско-Китайского молодеж. инновац. фор. – Минск, БНТУ, 2016. – С. 148-149.

33. 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 в современных условиях: материалы Междунар. науч.-практич. конф. – Минск: БелНИИТ «Транстехника», 2016. – С. 26-30.

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

35. 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. 84-87.

36. 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. – Горки БГСХА, 2018. – С. 29-32.

37. 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. – Горки БГСХА, 2020. – Вып. 5. – С. 142-147.

38. Малышкин, П. Ю. Изменение основных эффективных и экологических показателей дизеля с добавкой газа / П. Ю. Малышкин // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. материалов XVIII межвуз. науч.-практ. конф. – Барнаул, 2023. – С. 139-141.

Подписано в печать 27.12.2023.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага для множительных аппаратов.

Печать ризографическая. Гарнитура «Таймс».

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 2058.

---

Отпечатано в отделении ризографии и художественно-оформительской  
деятельности УО БГСХА  
213407, Республика Беларусь, г. Горки Могилевской обл., ул. Мичурина, 5