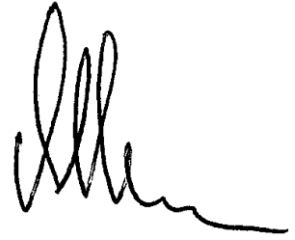


На правах рукописи



ПЕНКИН АЛЕКСЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ

**МЕТОДИКА УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ГАЗОДИЗЕЛЕЙ ПОВЫШЕНИЕМ
ОДНОРОДНОСТИ И РАВНОМЕРНОСТИ ПОДАЧИ
ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ**

Специальность 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» на кафедре транспортно-технологических машин

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Капустин Александр Александрович
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Иванченко Александр Андреевич
ФБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций», заведующий кафедрой судовых энергетических установок, технических средств и технологий

кандидат технических наук, доцент
Давыдов Николай Артемьевич
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», доцент кафедры технической эксплуатации транспортных средств

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»**

Защита состоится « 20 » ноября 2012 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190103, Санкт-Петербург, ул. Курляндская, д. 2/5, ауд. 340-К.

Факс: (812) 316–58–72, e-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, СПбГАСУ, диссертационный совет.

Автореферат разослан «___» октября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, доцент



С.В. Репин

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Долгосрочная обеспеченность России природным газом и перспективность его широкого использования в качестве моторного топлива придают исследованиям, посвящённым улучшению эксплуатационных показателей автомобильных газодизелей безусловную актуальность и приоритетность. В общей задаче особую значимость исследуемая тема имеет при использовании газового топлива на автомобильном транспорте.

Использование природного газа в качестве альтернативного моторного топлива сегодня представляется исключительно целесообразным. Наличие в стране его внушительных запасов, изученность физических процессов сжигания, низкая отпускная цена сравнительно с жидкими топливами, безопасность, высокая скорость возврата вложенных средств, экологичность – по этим показателям природный газ на сегодня занимает первое место среди альтернативных топлив. Снижение темпов роста тарифов на перевозки, сокращение дотаций на пассажирский муниципальный автомобильный транспорт, уменьшение затрат на топливо в сельском хозяйстве, создание новых рабочих мест – в совокупности служит дополнительным стимулом для перехода на природный газ в качестве моторного топлива.

Природный газ может применяться в дизелях путём перехода на газодизельный процесс - когда газоздушная смесь в цилиндре воспламеняется от «запальной» дозы дизельного топлива. Преимущества газодизельного процесса заключаются в возможности быстрого перехода на работу с дизельного топлива на газ и обратно без существенных конструктивных изменений базового варианта дизеля.

Но развитие газодизелей в России сдерживается рядом факторов: отсутствует инфраструктура для эксплуатации автомобильной техники, работающей на природном газе, у заводов-изготовителей нет конструкций газодизелей, соответствующих требованиям технических регламентов, не достаточно научных исследований рабочего процесса газодизеля, нет работ по повышению качества смесеобразования.

Всё перечисленное дает основание считать исследования, направленные на разработку методики улучшения эксплуатационных показателей автомобильных газодизелей, актуальной научной задачей, имеющей важное практическое значение.

Степень изученности проблемы

В качестве основы при разработке конструкции и расчёте элементов системы приготовления газоздушной смеси взяты методологические разработки по использованию природного газа в дизелях, выполненные специалистами КамАЗа, НИЦИАМТ, НАМИ, Вятской ГСХА, СЗПИ, СПбГАУ, СПбГУСЭ в реализованных автомобильных газодизелях. В 1990 г. было освоено серийное производство гаммы газодизельных автомобилей бортовых КамАЗ-33208, КамАЗ-53218, седельного тягача КамАЗ-54118 и автомобиля-самосвала КамАЗ-55118.

Исследования и испытания газодизелей показали, что такие двигатели по расходу жидкого топлива экономичнее дизелей на 80-95%. При этом тягово-скоростные свойства автомобилей практически не изменяются. В ходе исследований установлено снижение уровней внешнего и внутреннего шума газодизельных автомобилей при работе режиме на 3 - 6 дБ (А). Снижается количество вредных выбросов с отработавшими газами до уровня экологического класса 4.

Достигнутые экологические и экономические показатели газодизелей - не предел. Как свидетельствуют предварительные проработки, их можно улучшить за счет совершенствования системы приготовления газозвдушной смеси качественно-количественным регулированием и введением электронного управления системой питания газодизеля. Но известные схемы приготовления газозвдушной смеси в газодизеле не устраняют неоднородности её состава и неравномерности распределения.

Не создана инфраструктура для обеспечения эксплуатации газодизельных автомобилей, работающих на природном газе, в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Поэтому актуальна разработка комплексной программы развития сети автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС), соответствующей приросту парка автомобильного транспорта, работающего на природном газе.

Цель работы – разработка методики улучшения эксплуатационных показателей автомобильных газодизелей повышением однородности и равномерности подачи газозвдушной смеси.

Основными задачами работы являются:

- анализ известных автомобильных конструкций систем питания автомобильных газодизелей, работающих на природном газе;
- разработка математической модели процесса подачи однородной и равномерной газозвдушной смеси в газодизель с газовым аккумулятором;
- разработка методики расчета газового аккумулятора для повышения однородности и равномерности подачи газозвдушной смеси в газодизель;
- теоретическое обоснование необходимости установки газового аккумулятора для обеспечения однородности и равномерности подачи газозвдушной смеси в газодизель;
- экспериментальные исследования автомобильной техники с газодизелем, оборудованной усовершенствованной системой подачи газозвдушной смеси;
- разработка программы перевода дизельного автотракторного парка агропромышленного комплекса Ленинградской области на природный газ (газодизельный процесс);
- технико-экономическое обоснование создания инфраструктуры для перевода дизельной автомобильной техники на природный газ.

Методы исследования:

- математическое моделирование рабочего процесса газодизеля;
- экспериментальные методы анализа состава отработавших газов с использованием современной газоаналитической и режимометрической аппаратуры;
- методы математической статистики для обработки результатов экспериментов;

- натурные испытания газодизелей и автотракторной техники, работающей на природном газе.

Объект исследования: системы подачи газозвдушной смеси в газодизель.

Предмет исследования: методики приготовления однородной и равномерной газозвдушной смеси для газодизеля.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель процесса подачи однородной и равномерной газозвдушной смеси в газодизель с газовым аккумулятором;

- разработана методика расчета газового аккумулятора системы подачи однородной и равномерной газозвдушной смеси в газодизель;

- теоретически и экспериментально обоснована необходимость установки газового аккумулятора для обеспечения однородности и равномерности подачи газозвдушной смеси в газодизель.

Практическая полезность работы

Разработанная методика улучшения эксплуатационных показателей автомобильных газодизелей позволяет снизить затраты в эксплуатации на дизельное топливо и природный газ и уменьшить количество выбросов вредных веществ с отработавшими газами в окружающую среду. Разработанная математическая модель позволяет оптимизировать параметры системы подачи газозвдушной смеси газодизеля.

Разработанная программа перевода дизельного автотракторного парка агропромышленного комплекса Ленинградской области на природный газ (газодизельный процесс) позволяет снизить затраты в эксплуатации на дизельное топливо и уменьшить количество выбросов вредных веществ.

Реализация результатов работы:

Разработан комплект эксплуатационной и конструкторской документации на систему питания газодизеля, который реализован:

1. при переоборудовании двух тракторов МТЗ-82 в условиях эксплуатации для использования природного газа в качестве топлива в ООО «Лентрансгаз»;

2. при переоборудовании одного трактора МТЗ-82 в Северо-Западной Государственной зональной машиноиспытательной станции в г. Волосово Ленинградской области (договор с комитетом по агропромышленному и рыбохозяйственному комплексу Ленинградской области).

Комплект эксплуатационной и конструкторской документации по усовершенствованию системы приготовления и подачи газозвдушной смеси в газодизель передан в ЦНИИАМТ НАМИ.

Разработанная программа перевода дизельного автотракторного парка агропромышленного комплекса Ленинградской области на природный газ (газодизельный процесс) на период 2008-2015 г.г. передана в Комитет по агропромышленному комплексу Ленинградской области и принята к внедрению.

Результаты диссертационной работы используются в курсе лекций и в расчетно-аналитических заданиях по дисциплине «Автотракторное оборудование и двигатели внутреннего сгорания» для студентов специальностей «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» и «Механи-

зация и автоматизация строительства» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены:

- на МНТК «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей» (СПбГАУ, СПб 2007-2011 гг.);

- на 60-й МНТК молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (СПбГАСУ, СПб, 2007 г.);

- на VII Международном экологическом форуме «Экологическое благоустройство жилых территорий крупных городов России» (СПб, 2007 г.);

- на X Международной конференции «Экология и развитие общества» (СПб, 2007 г.);

- на МНТК «Актуальные проблемы эксплуатации АТС» (ВлГУ, Владимир, 2007 г.);

- на IV МНТК «Автотранспорт: от экологической политики до повседневной практики» (СПб 2008 г.);

- на МНТК «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление» (СПГУВК, СПб, 2009 г.);

- на IV Международном форуме «Транспортная безопасность России» (СПб, 2011 г.);

Диссертационная работа связана с выполненными НИОКР:

1. «Научное обоснование и выбор параметров элементной базы системы приготовления газовоздушной смеси газовой модификации дизеля с наддувом 12 ГЧН 18/20» - договор с ОАО «Звезда». № гос. регистр. 1.1.04;

2. «Разработка конструкторской и эксплуатационной документации по переоборудованию трактора МТЗ-82 для использования природного газа в качестве топлива (газодизель)», договор с ООО «Лентрансгаз». Гос. контракт № 9/01 от 12.12.2005;

3. «Разработка конструкторской и эксплуатационной документации по переоборудованию трактора МТЗ-82 для использования природного газа в качестве топлива (газодизель)». Гос. контракт №32 от 03.07.2006;

4. «Разработка технико-экономического обоснования и программа перевода машинно-тракторного парка агропромышленного комплекса Ленинградской области на альтернативное газовое моторное топливо (сжиженный природный газ, компримированный природный газ, биогаз)». Гос. контракт № 2/04 от 12.12.2006;

5. «Обоснование, разработка и испытание системы питания трактора МТЗ - 82 на рапсовом масле». Гос. контракт №26 от 06.04.2007;

6. «Исследование системы факторов и условий эффективного развития автотранспортного комплекса (АТК) на региональном уровне». № гос. регистр. 1.2.07. Фундаментальное исследование, 2007 - 2011 гг.:

6.1. Научное обоснование построения системы индикаторов оценки состояния и развития АТК в регионе. 2007 г.;

6.2. Изучение условий и факторов реформирования АТК на современном этапе. 2008 г.;

6.3. Бизнес-инновации в развитии АТК в условиях региона. 2009 г.;

6.4. Стратегические направления формирования рынка автотранспортных услуг с учётом его реформирования на уровне региона. 2010 г.;

6.5. Направление и формы модернизации технического обслуживания АТК в регионе. 2011 г.

Публикации. По теме исследования опубликовано 26 печатных работ. Из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, по теме диссертации получен патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 142 страницах основного текста и 5 страницах приложений, содержит 41 рисунок и 14 таблиц.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработана математическая модель процесса подачи однородной и равномерной газозооушной смеси в газодизель с газовым аккумулятором

Исследования, выполненные в последнее десятилетие, показали, что в организации рабочего процесса газодизеля сформулирована часть общих требований к впускной системе для обеспечения равномерности состава рабочей смеси, одно из которых – постоянство давления газа. Неисследованным остаётся вопрос подачи в цилиндры газодизеля одинаковой по составу и количеству газозооушной смеси. С решением этой задачи возможно улучшение эксплуатационных показателей газодизеля: топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ).

В современных автомобильных газодизелях чаще применяются системы распределённого впрыска, где газ дозируется форсунками, установленными во впускном трубопроводе. Точность подачи природного газа (ПГ) зависит как от конструкции форсунок, так и от стабильности поддержания заданного давления перед ними. Перепад давления на газовой форсунке влияет на погрешность топливоподачи. При открытии газовой форсунки в газовой системе возникают пульсации давления, амплитуда которых достигает $\pm (10-15\%)$ от рабочего уровня [1].

Анализ конструкций газобаллонного оборудования автотракторных газодизелей выявил необходимость установки газового аккумулятора (ГА) между газовым редуктором низкого давления и газовой форсункой. Газовый аккумулятор должен поддерживать неизменным давление, создаваемое газовым редуктором перед форсунками на всех рабочих режимах двигателя.

Для исследования (анализа и прогнозирования) работы газодизеля была разработана математическая расчетно-экспериментальная модель газодизеля с ГА в системе подачи газозооушной смеси. Газодизель в разработанной математической модели представляется совокупностью конструктивных и режимных параметров, а также регрессионных уравнений, полученных по результатам эксперимента.

Математическая модель газодизеля с ГА представляет собой комплекс уравнений, содержащих стандартный набор элементов методики теплового расчёта ДВС с добавлением элементов, учитывающих влияние ГА в системе подачи газоздушнoй смеси на эффективные показатели и на показатели токсичности газодизеля путём введения в расчёт главного показателя ГА – коэффициента запаса газа в газовом аккумуляторе (коэффициент запаса газа k_3 показывает - во сколько раз больше газа по сравнению с его максимальным расходом находится в ГА). Модель позволяет достичь значений показателей токсичности газодизеля, соответствующих требованиям экологического класса 5, снижения удельного эффективного расхода топлива при сохранении значений других эффективных показателей газодизеля за счёт повышения однородности и равномерности подачи газоздушнoй смеси в газодизель. Математическая модель построена по алгоритму, представленному на рис.1. и рассчитана с использованием пакетов прикладных программ (ППП) Mathcad и Matlab.

Показатели токсичности газодизеля в зависимости от k_3 при различных значениях p_e – среднего эффективного давления и $G_{3,0}$ - запальной дозы дизельного топлива:

1. Содержание в ОГ газодизеля NO_x (млн⁻¹).

$$p_e = 0,2 \text{ МПа}, G_{3,0} = 2,1 \text{ кг/ч:}$$

$$NO_x = 627,8 + 0,6k_3^2 - 28,3k_3 \quad (1)$$

$$p_e = 0,4 \text{ МПа}, G_{3,0} = 3,9 \text{ кг/ч:}$$

$$NO_x = 1288,9 + 7,8k_3^2 - 146,7k_3 \quad (2)$$

$$p_e = 0,6 \text{ МПа}, G_{3,0} = 4,3 \text{ кг/ч:}$$

$$NO_x = 1421,7 - 1,8k_3^2 - 53,5k_3 \quad (3)$$

2. Содержание в ОГ газодизеля CH (млн⁻¹).

$$p_e = 0,2 \text{ МПа}, G_{3,0} = 2,1 \text{ кг/ч:}$$

$$CH = 11200 - 50k_3^2 + 50k_3 \quad (4)$$

$$p_e = 0,4 \text{ МПа}, G_{3,0} = 3,9 \text{ кг/ч:}$$

$$CH = 10977,8 + 5,6k_3^2 - 483,3k_3 \quad (5)$$

$$p_e = 0,6 \text{ МПа}, G_{3,0} = 4,3 \text{ кг/ч:}$$

$$CH = 6255,6 + 36,1k_3^2 - 691,7k_3 \quad (6)$$

3. Содержание в ОГ газодизеля CO (%).

$$p_e = 0,2 \text{ МПа}, G_{3,0} = 2,1 \text{ кг/ч:}$$

$$CO = 0,242 + 5,6 \cdot 10^{-5}k_3^2 - 2,8 \cdot 10^{-3}k_3 \quad (7)$$

$$p_e = 0,4 \text{ МПа}, G_{3,0} = 3,9 \text{ кг/ч:}$$

$$CO = 0,252 + 5,6 \cdot 10^{-5}k_3^2 - 2,8 \cdot 10^{-3}k_3 \quad (8)$$

$$p_e = 0,6 \text{ МПа}, G_{3,0} = 4,3 \text{ кг/ч:}$$

$$CO = 0,212 + 5,5 \cdot 10^{-5}k_3^2 - 2,8 \cdot 10^{-3}k_3 \quad (9)$$

Проверка адекватности математической модели при помощи критерия Фишера показала, что расхождение расчетных и экспериментальных данных находится в пределах доверительного интервала, коэффициент корреляции равен 0,91.

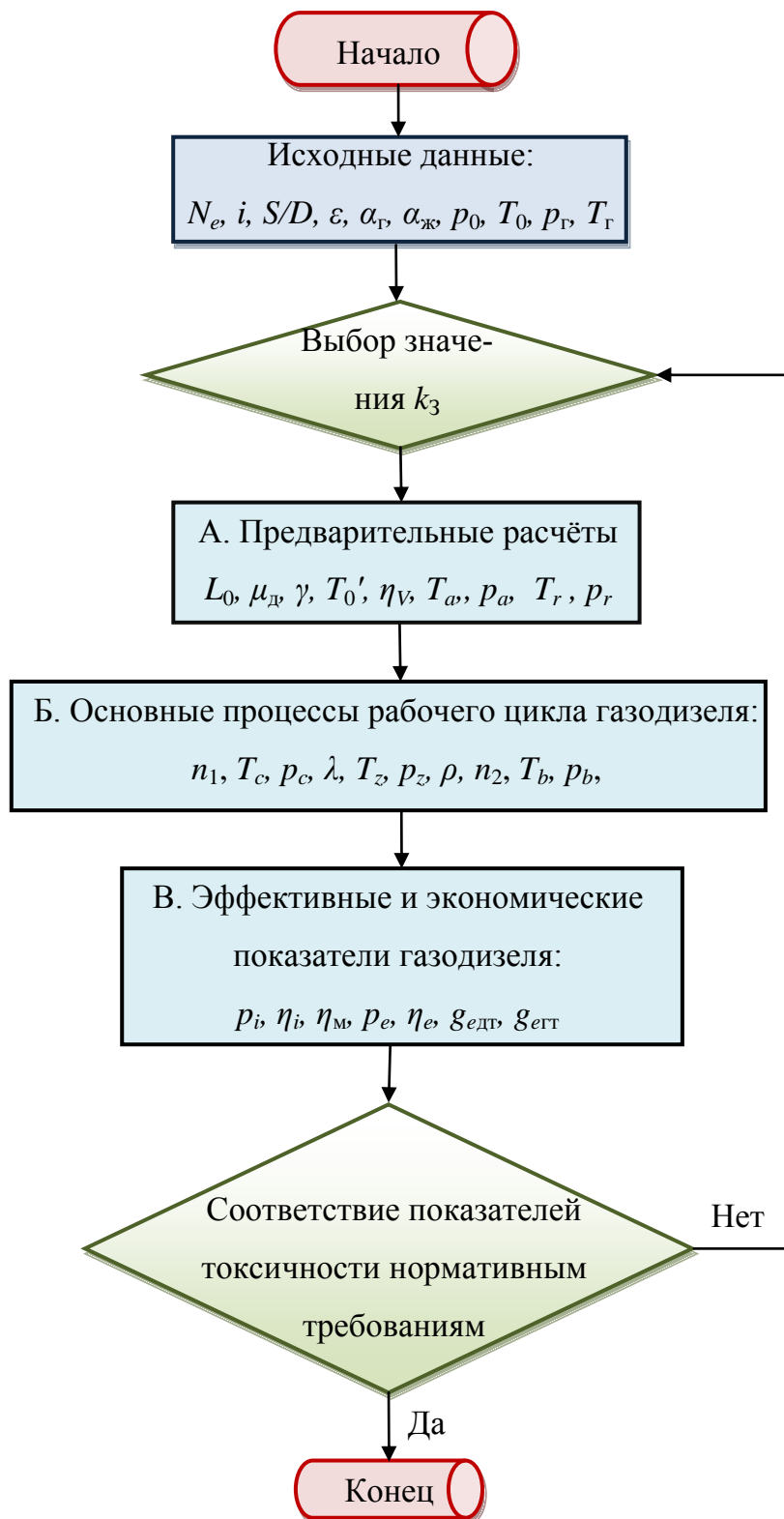


Рис.1. Алгоритм теплового расчета газодизеля, учитывающий влияние параметров газового аккумулятора на основные технико-эксплуатационные параметры газодизеля

2. Разработана методика расчета газового аккумулятора системы подачи однородной и равномерной газозвушной смеси в газодизель

Известные схемы и созданные по ним конструкции не обеспечивают необходимой однородности и равномерности подачи газозвушной смеси в газоди-

зель, это отрицательно влияет на экологические и эффективные показатели газодизеля. Для поддержания неизменным значения рабочего давления природного газа, создаваемого газовым редуктором перед форсунками, была обоснована схема системы подачи газовой смеси в газодизель (рис. 2) с ГА, установленным между газовым редуктором низкого давления и газовыми форсунками, в котором находится неснижаемый запас газа с необходимым рабочим давлением форсунки [5].

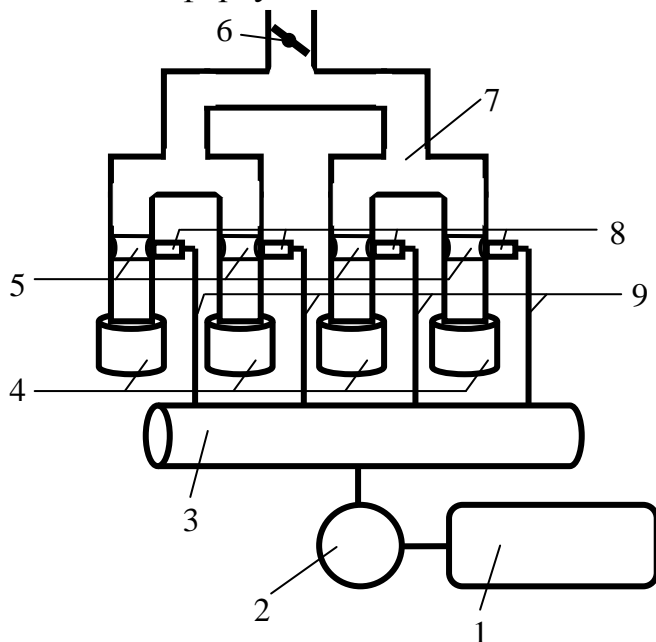


Рис. 2. Схема системы подачи газовой смеси в газодизель

На рис. 2:

- 1 - газовый баллон;
- 2 - газовый редуктор,
- 3 - газовый аккумулятор;
- 4 - впускные каналы головки блока газодизеля;
- 5 - газоздушные смесители;
- 6 - дроссельная заслонка;
- 7 - впускной воздушный коллектор;
- 8 - электромагнитные управляемые газовые форсунки;
- 9 - газовые трубопроводы.

Для определения оптимальных размеров ГА по заданным параметрам автомобильного газодизеля была разработана методика расчета объема ГА системы подачи газовой смеси для газодизеля.

Объем газового аккумулятора V_A , м³:

$$V_A = \frac{V_0 \times \rho_0}{\rho_A}, \quad (10)$$

ρ_A - плотность ПГ в ГА при рабочем давлении форсунки, кг/м³;

ρ_0 - плотность ПГ при поступлении в цилиндры двигателя, кг/м³;

V_0 - объем ПГ, необходимый для запаса в ГА, при плотности ρ_0 , Нм³.

Плотности ρ_i (ρ_A и ρ_0) газа при рабочих условиях, кг/м³:

$$\rho_i = \frac{\rho_C \times p_i \times T_C}{p_C \times T_i \times K_{Ci}}, \quad (11)$$

p_i - давление газа для рабочих условий (для условий ρ_A и ρ_0), МПа,

T_i - температура газа для рабочих условий, °С,

ρ_C - плотность газа при стандартных условиях, кг/м³,

T_C, p_C - температура и давление при стандартных условиях,

K_{Ci} - коэффициент сжимаемости для рабочих условий (ГОСТ 31369-2008).

Объем ПГ V_0 , необходимый для запаса в ГА, при плотности ρ_0 , Нм³:

$$V_0 = k_3 \times V_{ц.г.} \times i, \quad (12)$$

$V_{ц.г.}$ - максимальная подача ПГ в один цилиндр двигателя, Нм³;

i - количество цилиндров двигателя;

k_3 - коэффициент запаса газа в аккумуляторе ($k_3 = 1 \dots 10$).

Подставляя V_0 , ρ_0 и ρ_A из уравнений (11), (12) в уравнение (10), получим:

$$V_A = \frac{V_{ц.г.} \times k_3 \times i \times p_0 \times T_A \times K_{СА}}{p_A \times T_0 \times K_{С0}} \quad (13)$$

Разработанная методика расчета газового аккумулятора системы подачи газозвушной смеси позволяет рассчитать оптимальный объем ГА по заданным параметрам автомобильного газодизеля, используя уравнения (10) - (13).

3. Теоретически и экспериментально обоснована необходимость установки газового аккумулятора для обеспечения однородности и равномерности подачи газозвушной смеси в газодизель

Для применения разработанной методики расчета газового аккумулятора системы приготовления газозвушной смеси газодизеля проведены теоретические исследования, направленные на определение влияния параметров ГА на качество образования и подачи газозвушной смеси в газодизель. Первоначально рассмотрено 4 показателя качества (y): разность температур отработавших газов по цилиндрам; расход газа; расход дизельного топлива; концентрация несгоревших углеводородов; и 6 факторов (x), оказывающих основное влияние на качество образования и подачи газозвушной смеси в газодизель: нагрузка на двигатель; коэффициент запаса ГА; давление и температура газа перед газовой форсункой; давление и температура воздуха на впуске.

После оценки по критериям оптимальности показателем качества образования и подачи газозвушной смеси в цилиндры газодизеля выбрана разность температур отработавших газов по цилиндрам газодизеля ΔT (y), °С, а в качестве основных влияющих факторов - нагрузка на двигатель M (x_1), Н*м и коэффициент запаса ГА k_3 (x_2), б/р.

Для обоснования методики расчёта ГА решена многофакторная задача, направленная на определение оптимальных условий протекания процесса смесеобразования для газодизеля.

Решению этой задачи предшествовало исследование механизма процесса образования однородной смеси в системе подачи газозвушной смеси автомобильного газодизеля и свойств газа, поступающего в цилиндры газодизеля.

Для поиска оптимального значения коэффициента запаса газа в ГА методом градиентного поиска оптимума, который позволяет достичь окрестностей точки оптимума, была построена математическая модель на основе полинома второго порядка, служащего описанием поверхности отклика - зависимости между выходными параметрами (откликом) и входными параметрами (факторами).

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (14)$$

При построении модели был применён центральный композиционный план (план Бокса), где факторы принимают значения, симметричные относительно центра плана, в котором две независимые переменные принимают три различных значения.

В качестве ядра плана был использован полный факторный эксперимент для двух независимых переменных x_1 и x_2 : x_1 изменяется от 100 до 700, Н*м; x_2 изменяется от 1 до 10, б/р.

Таким образом, был получен полином второй степени с натуральными переменными (15), описывающий влияние нагрузки на двигатель и коэффициента запаса газового аккумулятора на качество образования и подачи газовой смеси в цилиндры газодизеля.

$$y = 60,112 + 0,203x_1 + 4,925x_2 + 0,004x_1^2 - 1,0504x_2^2 - 0,032x_1x_2 \quad (15)$$

По полученной модели были построены поверхности отклика в заданном факторном пространстве (рис. 3, 4).

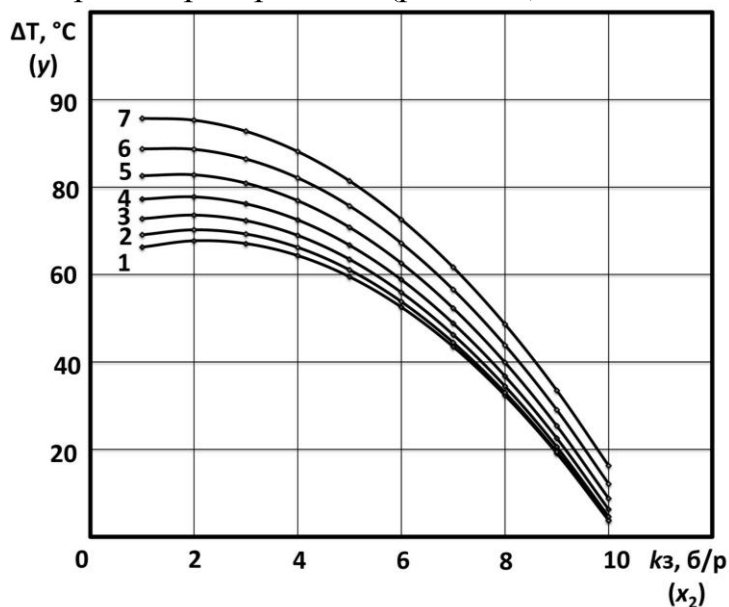


Рис. 3. Влияние коэффициента запаса ГА на разницу температур отработавших газов по цилиндрам 1 – $M = 100$ Нм; 2 – $M = 200$ Нм; 3 – $M = 300$ Нм; 4 – $M = 400$ Нм; 5 – $M = 500$ Нм; 6 – $M = 600$ Нм; 7 – $M = 700$ Нм.

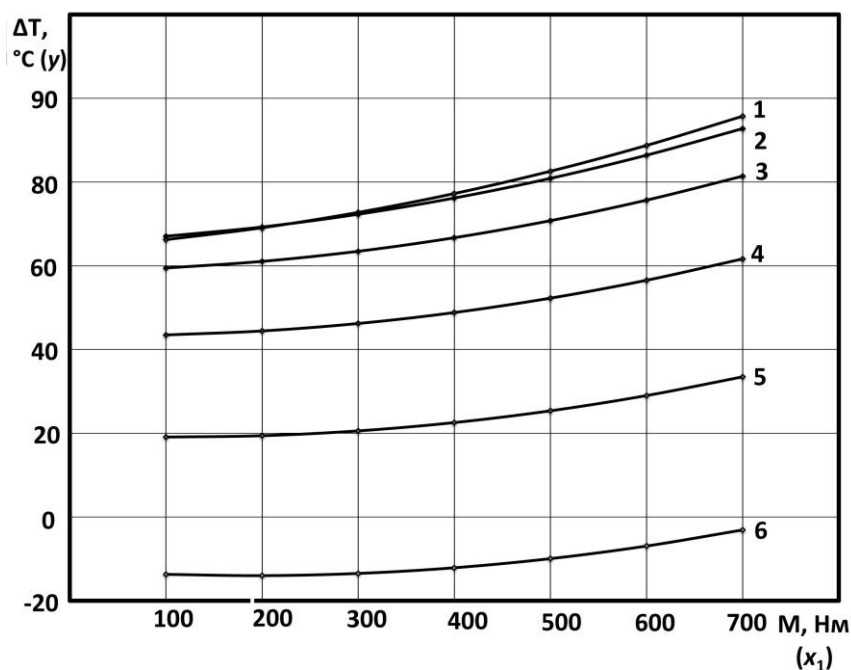


Рис. 4. Влияние нагрузки на двигатель на разницу температур отработавших газов по цилиндрам 1 - $k_3=1$; 2 - $k_3=3$; 3 - $k_3=5$; 4 - $k_3=7$; 5 - $k_3=9$; 6 - $k_3=11$.

При приведении полинома (15) к канонической форме получено уравнение гиперболического цилиндра.

В результате теоретических исследований разработана методика расчета газового аккумулятора системы подачи однородной и равномерной газовой смеси для газодизеля, определено влияние газового аккумулятора на качество образования и подачи газовой смеси в цилиндры газодизеля определено оптимальное значение коэффициента запаса газа k_3 в ГА, равное 10.

Для проверки экспериментом результатов теоретических исследований о влиянии параметров ГА на качество образования и подачи газовой смеси в цилиндры газодизеля была разработана схема усовершенствованной системы подачи газовой смеси в газодизель КамАЗ-7409 с ГА, представленная на рис. 5.

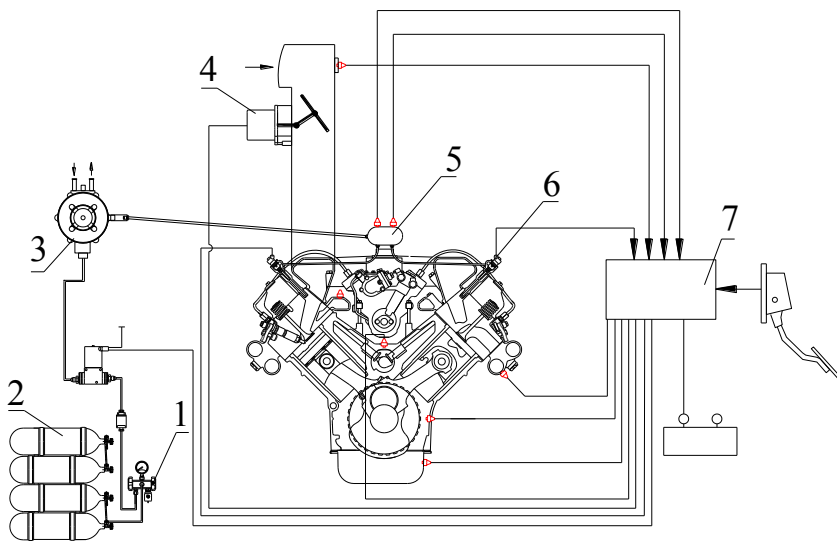


Рис. 5. Схема усовершенствованной системы питания газодизеля КамАЗ-7409

Сжатый природный газ из баллонов 2 поступает в редуктор высокого давления 1, (снижение давления до 1 МПа). Затем газ поступает в одноступенчатый редуктор низкого давления 3. С требуемым для оптимальной работы газовой форсунки давлением 0,3 МПа, газ поступает в газовый аккумулятор 5, где находится неснижаемый запас газа под рабочим давлением форсунки. Данный

запас компенсирует неравномерность подачи газа из газового редуктора к газовым форсункам на различных режимах работы двигателя. Из газового аккумулятора газ по линиям подвода газа поступает к электромагнитным газовым форсункам 6, управляемым микропроцессорным блоком 7. Управление работой двигателя производится изменением положения дроссельной заслонки 4.

При стендовых испытаниях газодизеля КамАЗ-7409 со стандартной системой подачи газа во впускной коллектор обнаружена разница температур отработавших газов по цилиндрам двигателя, которая достигает 22% (рис 6).

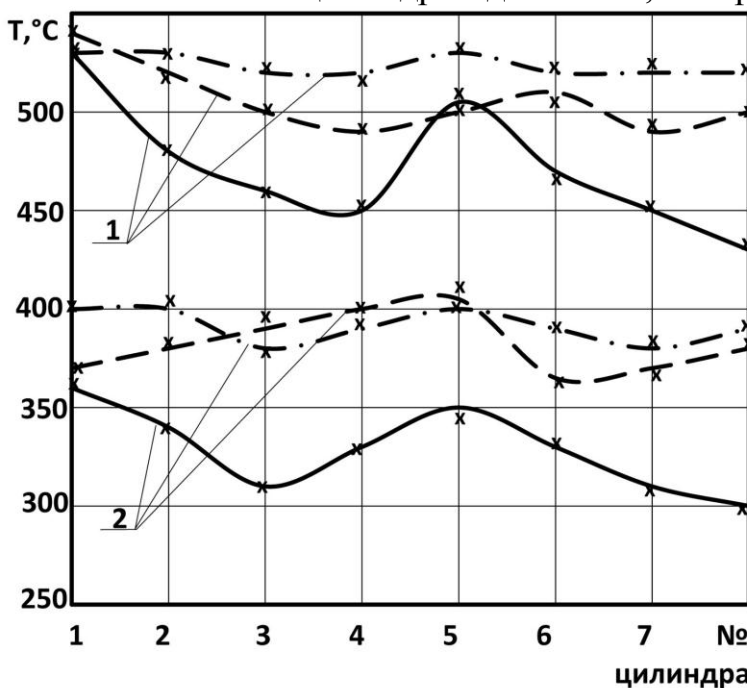


Рис. 6. Зависимость температуры отработавших газов в цилиндрах газодизеля от нагрузки и объема газового аккумулятора

1 - нагрузка - 700 Н*м; 2 - нагрузка - 100 Н*м;
 — без ГА; --- $k_3=5$; -·-·- $k_3=10$

Это указывает на различие коэффициента избытка воздуха и на неравномерность поступления газозоудной смеси по цилиндрам газодизеля. При соответствующих условиях количественная неравномерность определяется характером распределения фракций по удельному весу [2].

Разработанная система подачи газозоудной смеси в газодизель с ГА позволила снизить расхождение температур отработавших газов по цилиндрам до 2%. Графики на рис. 6 указывают на отрицательное влияние установки стандартной инжекторной системы пода-

чи природного газа в коллектор газодизеля. Разработанная система подачи газозвушной смеси в газодизель с газовым аккумулятором с $k_3 = 10$ снижает разницу температур отработавших газов по цилиндрам с 22% до 2%. Исследования проводились при работе двигателя в газодизельном режиме с системой подачи газозвушной смеси без ГА, и с газовыми аккумуляторами различного объёма: с $k_3 = 5$ и $k_3 = 10$. Результаты стендовых испытаний газодизеля КамАЗ-7409 отражены на рис. 7, 8.

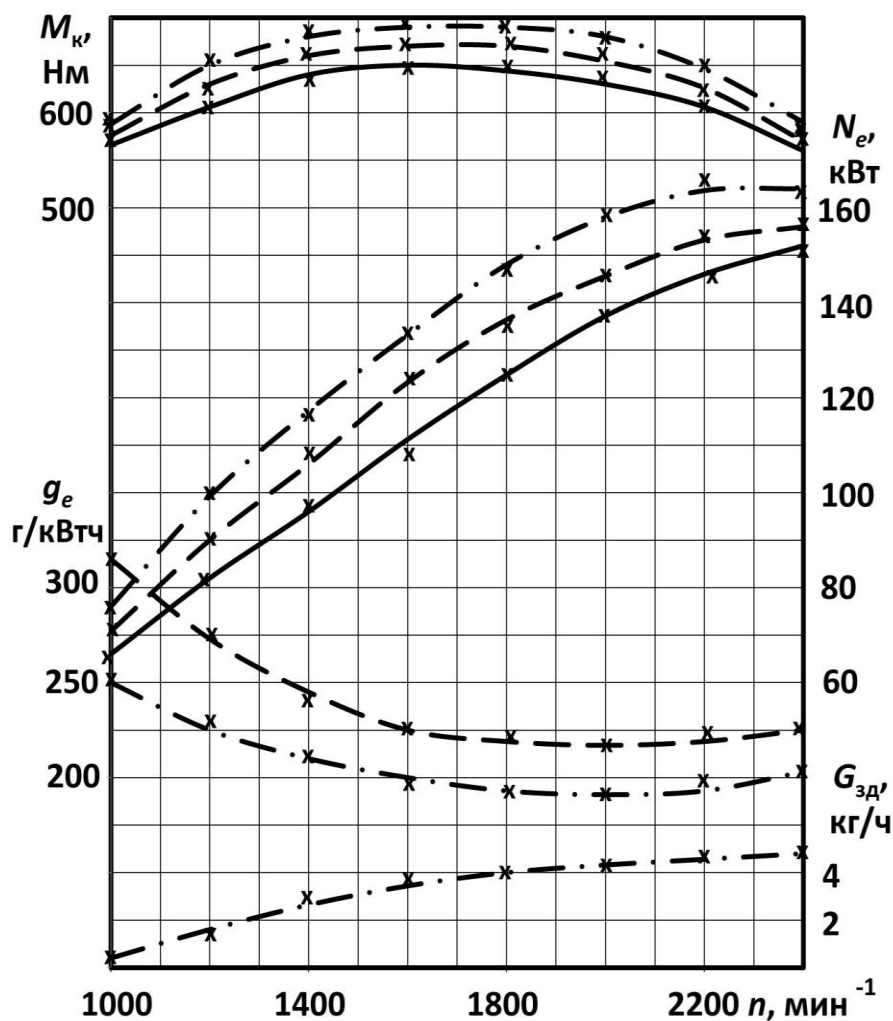


Рис. 7. Внешняя скоростная характеристика газодизеля КамАЗ-7409
 — без ГА; --- $k_3 = 5$; -·-·- $k_3 = 10$

Максимальная эффективная мощность газодизеля КамАЗ-7409 (рис. 7) с разработанной системой подачи газозвушной смеси и газовым аккумулятором с $k_3 = 10$ выше на 5%, чем с $k_3 = 5$, и выше, чем у газодизеля без ГА на 7%. Максимальный крутящий момент у газодизеля с газовым аккумулятором с $k_3 = 10$ выше на 3%, по сравнению с $k_3 = 5$. Удельный эффективный расход топлива снижается на 11 % при установке ГА с $k_3 = 10$.

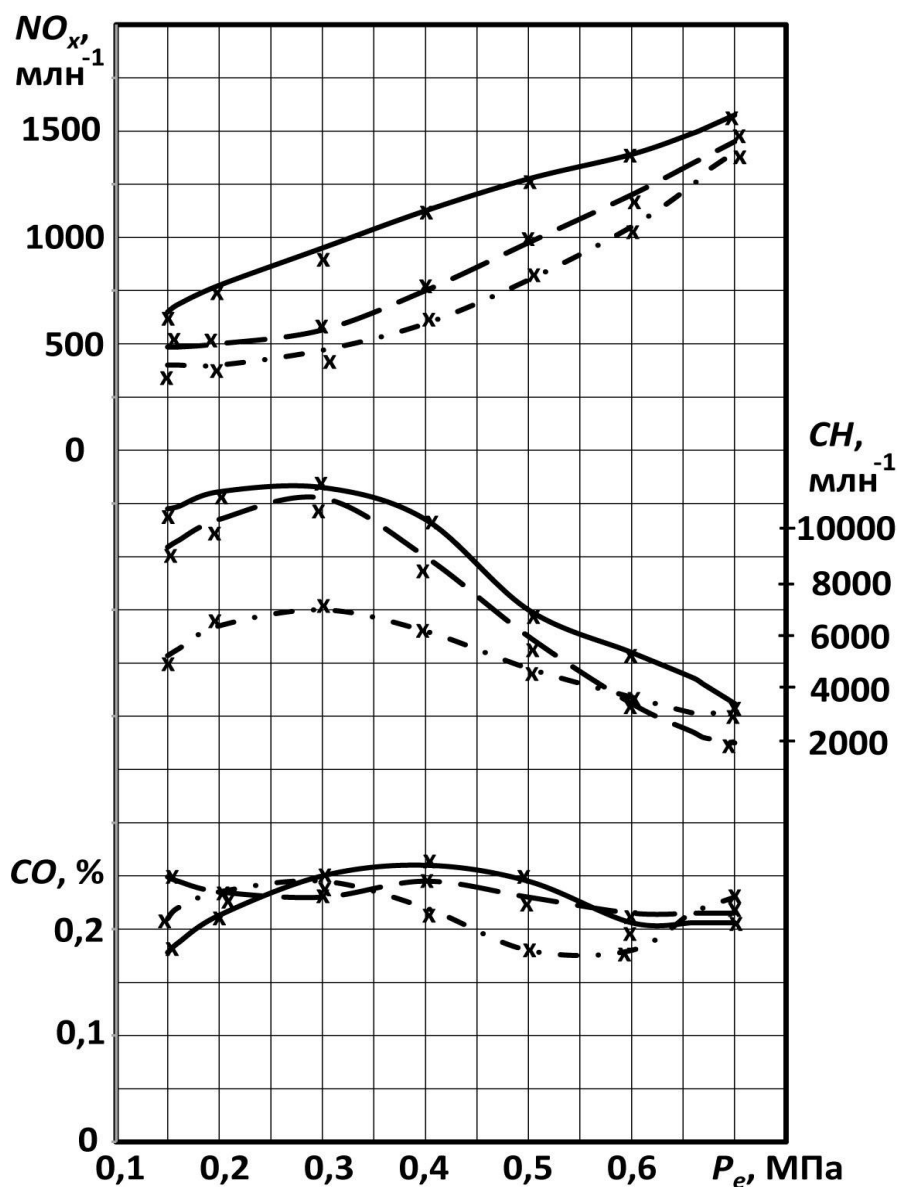


Рис. 8. Нагрузочная характеристика газодизеля КамАЗ-7409 при $n=2550 \text{ мин}^{-1}$
 — без ГА; --- $k_3 = 5$; -·-·- $k_3 = 10$

Нагрузочные характеристики газодизеля КамАЗ-7409 при $n=2550 \text{ мин}^{-1}$ приведены на рис. 10. Из графиков видно, что выбросы NO_x , CH и CO уменьшаются при увеличении k_3 . Установка в систему подачи газозвоздушной смеси ГА с $k_3 = 10$ по сравнению с $k_3 = 5$ в среднем снижает выбросы NO_x на 25%, CO на 3%, а CH на 57%.

Проверка экспериментом результатов теоретических исследований о влиянии параметров ГА на качество образования и подачи газозвоздушной смеси в цилиндры газодизеля была также проведена на тракторе МТЗ-82 с газодизелем Д-243 в ФГУ «Северо-Западной МИС (п. Волосово)».



Рис. 9. Газодизельный колёсный трактор МТЗ-82 с газодизелем Д-243 на испытательном стенде ФГУ «Северо-Западной МИС»



Рис. 10. Компонировка основных узлов системы питания на газодизельном тракторе МТЗ-82

Разработанная усовершенствованная система питания газодизеля Д-243 аналогична системе питания газодизеля КамАЗ-7409, изображённой на рис. 5. Различие - в размерах газового аккумулятора. Результаты стендовых испытаний газодизельного трактора МТЗ-82 с разработанной системой подачи газозвушной смеси при работе без ГА и с ГА с $k_3 = 10$ отражены на рис. 11, 12.

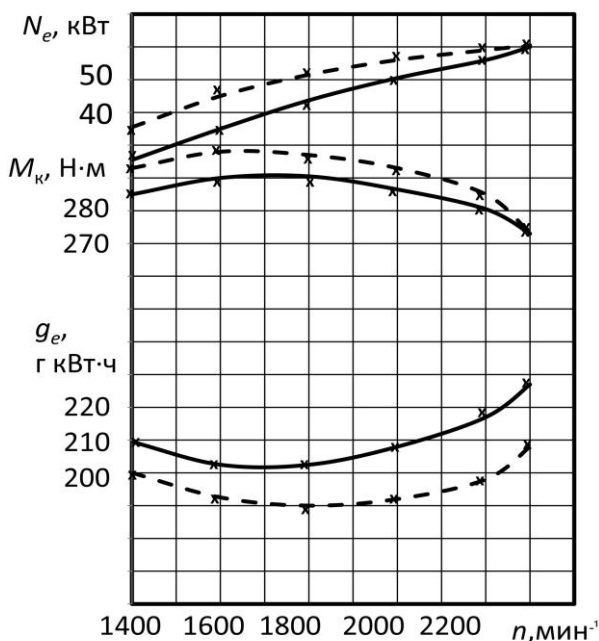


Рис. 11. Внешняя скоростная характеристика газодизеля Д-243
 — без ГА; - - - - $k_3 = 10$

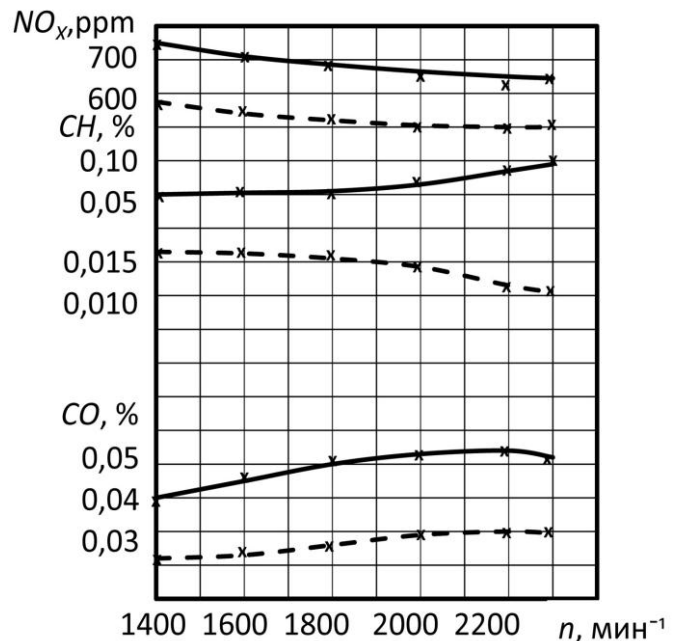


Рис. 12. Показатели токсичности по внешней скоростной характеристике газодизеля Д-243
 — без ГА; - - - - $k_3 = 10$

Зависимости (рис. 11, 12) показывают, что при установке системы подачи газозвушной смеси с ГА с $k_3 = 10$ на газодизель Д-243 трактора МТЗ-82, при идентичной максимальной эффективной мощности, максимальный крутящий момент газодизеля с ГА с $k_3 = 10$ выше на 3%, эффективный удельный расход топлива снижается на 5 %. При установке в систему подачи газозвушной

смеси газодизеля ГА с $k_3=10$ выбросы NO_x снижаются в среднем на 27%, а CO на 83%. Выбросы CH при установке стандартной системы подачи газозвоздушной смеси (без ГА) в 2,5 раза выше, чем при установке системы с ГА с $k_3=10$, что обусловлено неполным сгоранием природного газа.

III. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Разработана программа перевода дизельного автотракторного парка агропромышленного комплекса Ленинградской области на компримированный природный газ (газодизельный процесс).

Комплексная программа перевода сельскохозяйственной техники и транспортных средств агропромышленного комплекса Ленинградской области на компримированный природный газ (КПГ) в 2008-2015 г.г. разработана для всех 17 районов Ленинградской области по основным сельхозпредприятиям.

Дизельный автотракторный парк агропромышленного комплекса Ленинградской области количественно (на 01.01.2009) составлял 7784 ед. (табл. 1). Коэффициент технической готовности составляет 0,75. КПГ в качестве топлива не используется. Значительно различается общее количество техники по районам. Так в Подпорожском районе всего 73 единицы техники, в том числе 15 грузовых автомобилей и 40 тракторов. А в Гатчинском районе 995 единиц техники, из которых 291 грузовых автомобилей и 534 трактора. Потребность сельхозпредприятий области в горюче-смазочных материалах на 2008 год по районам примерно соответствовал количеству техники. Внутри каждого района имеется несколько сельхозпредприятий, владельцев основной техники.

Таблица 1. Дизельный автотракторный парк агропромышленного комплекса Ленинградской области в 2009 г.

| Груз. авт. | Зерн. уб. комб. | Карт. уб. комб. | Косилки | Корм. уб. комб. | Трактора | Всего | 2008 г. |
|------------|-----------------|-----------------|---------|-----------------|----------|-------|---------------|
| | | | | | | | Диз. топливо, |
| 2538 | 191 | 165 | 69 | 419 | 3774 | 7784 | 65828 |

В целях упрощения модели газификации в основу программы положена суммарная потребность предприятий района в дизельном топливе и бензине. Агрокомплекс Ленинградской области располагает автотракторной техникой, которую можно разделить на две группы. Первая – это автомобили и колесные тракторы, для которых заправка газом должна находиться в радиусе 5-10 км от предприятия – владельца. Вторая – комбайны и внедорожная сельхозтехника, для которых заправка газом возможна на машинном дворе, а дозаправка – на рабочем месте в поле. Газификация требует создать приближенную к местам базирования автотракторного парка рациональную и эффективную областную сеть АГНКС с закрепленными за ней передвижными автомобильными газовыми заправщиками (ПАГЗ). Рациональной может быть предлагаемая новая методика создания сети областных внутрирайонных станций заправки автотранспорта КПГ.

Эффективность перевода на природный газ зависит от четырех основных факторов:

- стоимости покупаемого для АГНКС газомоторного топлива у газораспределительных компаний;
- стоимости продаваемого АГНКС КПП владельцам автомобильного транспорта;
- затрат на подготовку и сжатие КПП на АГНКС;
- наличия необходимых объемов КПП.

Программа газификации Ленобласти до 2015 г. предполагает разместить 54 модульных АГНКС. Для обеспечения заправок сельхозтехники в поле необходимо 44 ПАГЗ.

Разработанная программа перевода дизельного автотракторного парка агропромышленного комплекса Ленинградской области на природный газ (газодизельный процесс) на период 2008-2015 г.г. передана в Комитет по агропромышленному комплексу Ленинградской области и принята к внедрению.

2. Выполнено технико-экономическое обоснование создания инфраструктуры для перевода дизельной автомобильной техники на природный газ.

В работе выполнено технико-экономическое обоснование создания инфраструктуры для перевода дизельной автомобильной техники агропромышленного комплекса Ленинградской области на природный газ (газодизельный процесс). Расчёт выполнен для следующих условий:

- 100% дизельной автотракторной техники агропромышленного комплекса Ленинградской области переводится на газодизельный процесс;

- замещение 85% расхода дизельного топлива природным газом;

$C_{зап}$ - стоимость запуска одной АГНКС - 15,0 млн. руб.

$C_{ПАГЗ}$ - стоимость ПАГЗ-2500-32/4 - 6,0 млн. руб.

$C_{п/а}$ - стоимость переоборудования автотракторной техники на газодизельный процесс от 65 тыс. руб. (МТЗ-82) до 145 тыс. руб. (КамАЗ), принимаем в среднем на единицу 105 тыс. руб.

C_d - цена дизельного топлива – 26 руб./л.

$C_{КПП}$ - цена КПП – 10 руб./ Нм³.

Условия реализации комплексной программы представлены в табл. 2

Таблица 2. Условия общей реализации комплексной программы

| Параметры | Единицы измерения | Значение |
|---|-------------------|----------|
| Затраты на выполнение комплексной программы: строительство АГНКС, покупка ПАГЗ, и переоборудование транспортных средств | млн. руб. | 1918,32 |
| Годовой доход при выполнении комплексной программы от экономии дизельного топлива | млн. руб. | 1638,5 |
| Срок окупаемости – 1,17 года | | |

Затраты при создании инфраструктуры для перевода дизельной автомобильной техники агропромышленного комплекса Ленинградской области на газодизельный процесс при условии реализации разработанной комплексной программы окупятся за 1,17 года.

IV. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для определения требований к впускной системе выполнен анализ известных конструкций систем питания автомобильных газодизелей, работающих на природном газе, который выявил проблему неоднородности и неравномерности подачи газозвушной смеси в газодизель, подтверждаемую разностью температуры отработавших газов по цилиндрам, достигающей на номинальном режиме 30%. Решением проблемы может стать установка газового аккумулятора между газовым редуктором низкого давления и газовыми форсунками.

2. Разработанная математическая модель процесса подачи однородной и равномерной газозвушной смеси в газодизель с ГА позволяет подбирать коэффициент запаса ГА и повысить показатели токсичности до требований экологического класса 5 при снижении удельного эффективного расхода топлива на 12 % с сохранением других эффективных показателей газодизеля.

3. Разработанная методика расчета газового аккумулятора системы подачи газозвушной смеси позволяет рассчитать оптимальный объем ГА по заданным параметрам автомобильного газодизеля.

4. Проведённое теоретическое исследование подтвердило необходимость установки газового аккумулятора. Выполненные расчеты для газодизеля КамАЗ-7409 определили значение коэффициента запаса газа k_3 в ГА, равное 10.

5. Выполненное экспериментальное исследование автомобильной техники с газодизелями, оборудованными усовершенствованной системой подачи газозвушной смеси, подтвердило снижение удельного эффективного расхода топлива на 11 % при установке ГА с $k_3 = 10$, показало, что при установке ГА с $k_3 = 10$ по сравнению с $k_3 = 5$ снижаются выбросы NO_x на 25%, CO на 3%, а CH на 57%.

6. Расхождение данных расчетных и экспериментальных исследований находится в пределах доверительного интервала, коэффициент корреляции равен 0,91.

7. Разработанная программа перевода дизельного автотракторного парка агропромышленного комплекса Ленинградской области на компримированный природный газ (газодизельный процесс) предполагает разместить 54 модульных АГНКС. Для обеспечения заправок сельхозтехники в поле необходимо 44 ПАГЗ.

8. Выполненное технико-экономическое обоснование создания инфраструктуры для перевода дизельной автомобильной техники на природный газ показало, что затраты при переводе дизельного автотракторного парка агропромышленного комплекса Ленинградской области на газодизельный процесс

при условии реализации разработанной комплексной программы окупятся за 1,17 года.

V. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях по перечню ВАК РФ.

1. **Пенкин, А. Л.** Система подачи газозвоздушной смеси в газодизель / А. Л. Пенкин // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2 (31). – С. 232-235.

2. **Пенкин, А. Л.** Газовый аккумулятор в системе подачи природного газа в двигатель внутреннего сгорания / А. Л. Пенкин // Двигателестроение. – 2012 – № 1. – С. 23-26.

3. **Шимченко, Н. И.** Перевод на природный газ МТП Ленинградской области / Н. И. Шимченко, А. Л. Пенкин, Д. В. Дубников // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 3. – С. 51-53.

4. **Капустин, А. А.** Природный газ – альтернативное топливо для сельскохозяйственной техники / А. А. Капустин, А. Л. Пенкин, Н. И. Шимченко // АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное топливо. – 2010. – № 2. – С. 13-18.

Патенты.

5. **Система подачи газозвоздушной смеси в двигатель** : пат. 2443898 Российская Федерация : МПК F02M21/00 (2006.01). / А. Л. Пенкин, А. А. Капустин, К. С. Беляев ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – № 2009139901 ; заявл. 28.10.2009 ; опубл. 10.05.2011. Бюл. № 6. – 7 с. : 1 ил., 3 табл.

Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций.

6. **Капустин, А. А.** Положительные экономические и экологические показатели газодизелей / А. А. Капустин, А. Л. Пенкин // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах : сб. докл. седьмой междунар. науч.-практ. конф. / СПбГАСУ. – СПб., 2006 – С. 500-502.

7. **Пенкин, А. Л.** Автобусы Петербурга / А. Л. Пенкин // История Петербурга. – 2007. – № 2. – С. 15-17.

8. **Пенкин, А. Л.** Повышение экологической безопасности автомобильного транспорта путем перехода на природный газ в качестве источника питания / А. Л. Пенкин // Актуальные проблемы современного строительства : сб. материалов 60-й междунар. науч.-техн. конф. / СПбГАСУ. – СПб., 2007. – Ч. 2. – С. 115-120.

9. **Оценка альтернативных источников энергии** / А. А. Капустин, А. Л. Пенкин, Н. И. Шимченко и др. // Экология и развитие общества : тр. X междунар. конф. : доп. выпуск под ред. В. А. Рогалева ; МАНЭБ. – СПб., 2007. – С. 56-59.

10. **Программа перевода сельскохозяйственной техники АПК Ленинградской области на КПГ в 2008-2015 гг.** / А. А. Капустин, А. Л. Пенкин, Н. И. Шимченко и др. // Экология и развитие общества : тр. X междунар. конф. : доп. выпуск под ред. В. А. Рогалева ; МАНЭБ. – СПб., 2007. – С. 59-61.

11. **Природный газ – топливо для сельскохозяйственной техники Ленинградской области** / А. А. Капустин, А. Л. Пенкин, Н. И. Шимченко и др. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств : материалы междунар. науч.-техн. конф. / ВлГУ. – Владимир, 2007. – С. 68-74.

12. **Капустин, А. А.** Перспективы использования альтернативных видов топлива автомобильным транспортом / А. А. Капустин, А. Л. Пенкин // Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. / СПбГАУ. – СПб., 2007. – С. 278-286.

13. **Пенкин, А. Л.** Повышение технико-экономических показателей автомобильного транспорта при использовании альтернативных топлив / А. Л. Пенкин, А. А. Капустин // Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. / СПбГАУ. – СПб., 2007. – С. 374-379.

14. **Пенкин, А. Л.** Повышение экологической безопасности городского автомобильного транспорта путем применения природного газа в качестве моторного топлива / А. Л. Пенкин, Н. И. Шимченко // Экологическое благоустройство жилых территорий крупных городов России : тр. науч.-практ. семинара VII междунар. экологического форума / МАНЭБ. – СПб., 2008. – С. 103-110.

15. **Пенкин, А. Л.** Природный газ - экологичное топливо для транспортных средств мегаполисов / А. Л. Пенкин, Н. И. Шимченко // Экологическое благоустройство жилых территорий крупных городов России : тр. науч.-практ. семинара VII междунар. экологического форума / МАНЭБ. – СПб., 2008. – С. 110-114.

16. **Пенкин, А. Л.** Повышение эксплуатационных показателей транспортных дизелей путем перевода на газодизельный цикл / А. Л. Пенкин // Докл. 65-й науч. конф. профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета / СПбГАСУ. – СПб., 2008. – Ч. 2. – С. 176-180.

17. **Пенкин, А. Л.** Пути улучшения экономических и экологических показателей работы газодизельных двигателей / А. Л. Пенкин, А. А. Капустин // Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. / СПбГАУ. – СПб., 2008. – С. 284-290.

18. **Капустин, А. А.** Оптимизация параметров газоздушных смесей для ДВС / А. А. Капустин, А. Л. Пенкин, А. В. Пономарёв // Автотранспорт: от экологической политики до повседневной практики : тр. IV междунар. науч.-практ. конф. / МАНЭБ. – СПб., 2008. – С. 66-70.

19. **Капустин, А. А.** Улучшение показателей транспортных дизельных установок при подаче на впуск смеси воздуха и природного газа / А. А. Капустин, А. Л. Пенкин, К. С. Беляев // Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление : материалы междунар. науч.-практ. конф. / СПГУВК. – СПб., 2009. – С. 314.

20. **Пенкин, А. Л.** Альтернативное топливо для городского автотранспорта / А. Л. Пенкин, А. А. Капустин // Автотранспорт: от экологической политики до повседневной практики: тр. V междунар. науч.-практ. конф. / МАНЭБ. – СПб., 2010. – С. 65-69.

21. **Пенкин, А. Л.** Повышение экологической безопасности городского автотранспорта путем применения природного газа / А. Л. Пенкин, А. А. Капустин // Охрана окружающей среды и природопользование. – 2010. – № 3. – С. 16-18.

22. **Пенкин, А. Л.** Повышение равномерности поступления газозоудушной смеси в транспортный газодизель с инжекторной системой распределённого впрыска / А. Л. Пенкин, А. А. Капустин, К. С. Беляев // Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. / СПбГАУ. – СПб., 2010. – С. 161 - 168.

23. **Капустин, А. А.** Регулирование автомобильного газодизеля / А. А. Капустин, А. Л. Пенкин // 5-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе : тезисы докладов юбилейной науч.-техн. конф. / МАДИ. – М., 2011 – С.112-113.