

**Нигматулин Ильдар Дагиевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ,  
ОСНАЩЕННЫХ ГАЗОБАЛЛОННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

**Специальность:** 05.20.03 – Технологии и средства технического  
обслуживания в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова».

**Научный руководитель –**

**Володин Виктор Владимирович,**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**

**Уханов Денис Александрович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Тракторы,  
автомобили и теплоэнергетика» ФГБОУ  
ВПО «Пензенская государственная  
сельскохозяйственная академия»

**Данилов Игорь Кеворкович,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Автомобили и  
двигатели» ФГБОУ ВПО «Саратовский  
государственный технический  
университет имени Гагарина Ю. А.»

**Ведущая организация**

ФГБОУ ВПО «Волгоградский  
государственный аграрный  
университет»

Защита диссертации состоится 18 июня 2014 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» и на сайте [www.sgau.ru](http://www.sgau.ru).

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 220.061.03.  
e-mail: [chekmarev.v@yandex.ru](mailto:chekmarev.v@yandex.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Чекмарев Василий Васильевич



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в дизельных двигателях все больше используется в виде альтернативного топлива природный газ (метан). При его использовании повышается эффективность работы сельскохозяйственных машин, снижается уровень дымности и выбросов твердых частиц с отработавшими газами.

В сельском хозяйстве основным способом перевода дизельных двигателей на более дешевое газообразное топливо является газодизельный цикл, который позволяет работать как на дизельном топливе, так и на его смеси с компримированным газом.

Для широкого внедрения в сельском хозяйстве тракторов, оснащенных газобаллонным оборудованием, необходимы дополнительное обоснование требований и разработка мероприятий по технике безопасности и техническому обслуживанию при эксплуатации газобаллонных тракторов, а также определение технико-экономических и экологических показателей их работы.

Актуальность этого направления подтверждена поручением Президента Российской Федерации от 18.10.2004 г. № Пр-1686 ГС «О стимулировании широкомасштабного перевода сельскохозяйственной техники на газомоторное топливо», распоряжением Правительства РФ от 13.05.2013 г. №767-р «О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива, в том числе природного газа в качестве моторного топлива».

**Степень разработанности темы.** В Российской Федерации имеется техническая документация и изготовлены образцы тракторов К-701, К-700А, Т-150К, МТЗ-80/82, ДТ-75, РТМ-160, переоборудованных для работы по газодизельному циклу, разработанные в ОАО «ВНИИГАЗ», ГНУ «ВИМ», ФГУП «НАТИ», ОАО «НЗТА», ЗАО «Автосистема» и ОАО «ППИ Дизельавтоматика», а также автомобилей производства ОАО «КамАЗ».

Отдельные модификации тракторов прошли испытания на Центральной, Кубанской, Поволжской и Владимирской государственных зональных машиноиспытательных станциях. Тракторы, оснащенные газобаллонным оборудованием, работают в Ставропольском крае, Саратовской, Волгоградской, Рязанской областях. При этом установлено, что применение газобаллонного оборудования в тракторе экономически целесообразно вследствие снижения расхода дизельного топлива, заменяемого природным газом. Эксплуатация тракторов с газобаллонным оборудованием имеет свои особенности при и требует дополнительных исследований и разработки дополнительных рекомендаций.

**Цель работы** – обоснование эксплуатационно-технологических показателей работоспособности сельскохозяйственных тракторов, оснащенных газобаллонным оборудованием.

### **Задачи исследования:**

1. Теоретически и экспериментально определить устойчивость тракторов с газобаллонным оборудованием и навесными орудиями.
2. Обосновать эксплуатационно-технологические требования к сельскохозяйственным тракторам, оснащенным газобаллонным оборудованием.



3. Исследовать экологические показатели двигателя при работе по газодизельному циклу.

4. Определить экономическую эффективность предлагаемых разработок.

**Объект исследования** – тракторы К-700А, РТМ-160, оснащенные газобаллонным оборудованием.

**Предмет исследования** – закономерности изменения устойчивости, безопасности и экологических показателей при использовании тракторов с газобаллонным оборудованием.

**Научную новизну** работы представляют:

– аналитические выражения для определения устойчивости трактора К-700А, работающего с навесными орудиями и оснащенного газобаллонным оборудованием, полученные с учетом особенностей тракторов с шарнирно сочлененной рамой;

– результаты экспериментальных исследований экологических показателей двигателей, работающих в газодизельном цикле;

– алгоритм и технология диагностирования тракторных двигателей, оснащенных газобаллонным оборудованием и работающих в газодизельном режиме.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

Теоретически и экспериментально определены предельные статические углы устойчивости трактора К-700А, работающего с навесными орудиями и оснащенного газобаллонным оборудованием. Проведен анализ расположения газовых баллонов для трактора РТМ-160.

Усовершенствована технология технического обслуживания тракторов, учитывающая использование сжатого газа в качестве топлива. Разработаны рекомендации по технике безопасности при эксплуатации и техническом обслуживании тракторов с газобаллонным оборудованием.

Рекомендации по совершенствованию технического обслуживания и техники безопасности использовались при доводке, изготовлении и эксплуатации трактора РТМ-160 на ОАО «НПК «Уралвагонзавод», а также при эксплуатации тракторов К-700А в ООО «Горизонт-С» Саратовской области и учтены при изготовлении системы питания газодизеля ООО «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов.

**Методология и методы исследования.** Исследования выполнены с использованием известных положений теоретической механики и эксплуатации машинно-тракторного парка, позволяющих определить статическую устойчивость трактора с навесными орудиями и разработать рекомендации по совершенствованию технического обслуживания тракторов.

**Положения, выносимые на защиту:**

– результаты теоретических и экспериментальных исследований устойчивости тракторов, оснащенных газобаллонным оборудованием и работающих с навесными орудиями;



– рекомендации по совершенствованию технологического обслуживания и техники безопасности при эксплуатации тракторов, работающих на газомоторном топливе;

– алгоритм и технология диагностирования системы подачи компримированного газа в тракторных двигателях.

**Степень достоверности и апробация результатов** обеспечена достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных данных, подтверждается экспериментальными исследованиями, выполненными в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Основные научные положения, выводы и практические рекомендации доложены и одобрены:

– на научно-практических конференциях ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова», г. Саратов (2007, 2008, 2010, 2014 гг.);

– на Международной научно-технической конференции «Научные проблемы развития ремонта, технического обслуживания машин, восстановления и упрочнения деталей», г. Москва, ГНУ ГОСНИТИ (2009, 2010, 2013 гг.);

– на Международной научно-технической конференции «Научные проблемы технического сервиса сельскохозяйственных машин», г. Москва, ГНУ ГОСНИТИ (2011 г.);

– на юбилейном семинаре, посвященном 110-летию со дня рождения академика ВАСХНИЛ В. Н. Болтинского, г. Москва, МГАУ им В. П. Горячкина (2014 г.);

– на постоянно действующем научно-техническом семинаре «Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания», г. Саратов (2006, 2008, 2010 гг.);

– на Международной научно-практической конференции, посвященной столетию со дня рождения Г. П. Шаронова «Проблемы эксплуатации и ремонта автотракторной техники», г. Саратов, Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова (2012 г.).

По результатам исследования опубликовано 10 работ, в т. ч. 6 статей в рецензируемых научных изданиях. Общий объем публикаций 3,9 п. л., из которых 2,1 п. л. принадлежат лично соискателю. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, общих выводов, списка литературы из 155 наименований, из них 36 на иностранном языке. Работа выполнена на 164 страницах, содержит 58 рисунков и 6 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены основные научные положения и практическая значимость проведенных исследований, их цель и задачи.

**В первом разделе «Состояние вопроса и задачи исследования»** рассматриваются вопросы использования газомоторного топлива в тракторных дизелях. На основе обзора технической литературы проведен анализ систем подачи газа в двигатель. Показано, что перевод сельскохозяйственных тракторов



на газообразное топливо при использовании газодизельного цикла позволяет значительно уменьшить затраты на топливо, улучшить экологические показатели повысить ресурс цилиндропоршневой группы.

Изучение использования сжатого природного газа как топлива для дизельных двигателей посвящены работы Г. Н. Абрамовича, В. И. Анискина, Ю. В. Бабкова, Е. В. Бебенина, Т. А. Букреева, В. В. Бушуева, В. В. Володина, А. И. Гайворонского, Б. П. Загородских, А. С. Козлова, С. И. Козлова, В. А. Лиханова, В. А. Лушко, В. А. Маркова, Г. С. Савельева, В. Г. Соколова и др.

Для широкого использования в агропромышленном комплексе тракторов с газобаллонным оборудованием необходимо проведение дополнительных исследований, в результате которых следует:

- оценить устойчивость трактора, работающего с навесными орудиями;
- разработать алгоритм и карту технического диагностирования;
- усовершенствовать рекомендации по технике безопасности при эксплуатации и техническом обслуживании с учетом использования газообразного топлива;
- определить экологические показатели и оценить эколого-экономические преимущества двигателей, работающих по газодизельному циклу.

**Во втором разделе «Теоретическое исследование устойчивости тракторов, оснащенных газобаллонным оборудованием с навесными орудиями»** рассмотрены теоретические аспекты устойчивости рассматриваемых тракторов, на основе чего выбрана наиболее безопасная компоновка газобаллонного оборудования на тракторе РТМ-160, а также определены предельные статические углы устойчивости трактора К-700А, работающего в агрегате с плугом ПЛН-8-35.

Параметрами, регламентирующими возможность работы трактора в эксплуатационных условиях, являются предельные углы продольного и поперечного уклонов, при которых трактор может стоять в заторможенном состоянии. Эти углы служат определяющими для оценки продольной и поперечной его устойчивости. Требованиями ГОСТ 12.2.019-2005 регламентируется угол поперечной статической устойчивости не менее  $35^\circ$  для тракторов тяговых классов 0,9 и более.

Для обоснования возможности работы трактора, оснащенного газобаллонным оборудованием, необходимо определить предельно допустимые значения данных углов.

Для реализации поставленной задачи исследования первоначально были определены основные масс-центровочные характеристики рассматриваемых тракторов, газобаллонного оборудования и плуга.

Для определения расположения центра тяжести плуга при помощи программы «Компас 3D-V14» была создана 3D-модель плуга ПЛН-8-35, на основе которой были определены основные масс-центровочные характеристики плуга.

Для определения координат центров тяжести кассет с газовыми баллонами была использована методика, согласно которой координаты центра тяжести агрегата, состоящего из нескольких составных элементов, определяются из



условия равенства моментов их сил тяжести относительно центра тяжести всего агрегата.

В процессе определения расположения центра тяжести кассета разбивалась на более простые элементы, баллоны, а также две межрамные балки.

В общем случае опрокидывание представляет собой вращательное движение трактора относительно некоторой оси, называемой осью опрокидывания, то есть это такой поворот трактора вокруг оси опрокидывания, при котором выполняется неравенство:

$$M_{\text{ОПР}} \geq M_{\text{СТАБ}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{ОПР}}$  – опрокидывающий момент, Н·м;

$M_{\text{СТАБ}}$  – момент от сил, стремящихся вернуть трактор в исходное положение, Н·м.

На тракторе РТМ-160 имеется возможность установки газовых баллонов как на крыше, так и над задней осью трактора. Поэтому в данном случае целесообразно провести сравнительную оценку различного расположения баллонов на тракторе.

Для этого было рассмотрено равновесие трактора РТМ-160, оснащенного газобаллонным оборудованием, установленного на подъеме, на уклоне и на поперечном уклоне. При этом были рассмотрены варианты установки газовых баллонов на крыше трактора и над его задней осью.

В результате проведенного анализа были получены аналитические выражения

1) для определения предельного статического угла подъема:

– при установке баллонов над задней осью трактора:

$$\alpha'_{\text{limПОД}} = \arctg \frac{G_T \cdot \bar{x} - G_B \cdot l'_{\text{ЦТб}}}{G_T \cdot h_{\text{ЦТ}} + G_B \cdot h'_{\text{ЦТб}}}, \quad (2)$$

– при установке баллонов на крыше трактора:

$$\alpha''_{\text{limПОД}} = \arctg \frac{G_T \cdot \bar{x} + G_B \cdot l''_{\text{ЦТб}}}{G_T \cdot h_{\text{ЦТ}} + G_B \cdot h''_{\text{ЦТб}}}, \quad (3)$$

2) для определения предельного статического угла уклona:

– при установке баллонов над задней осью трактора:

$$\alpha'_{\text{limУК}} = \arctg \frac{(G_T + G_B) - G_T \cdot \bar{x} + G_B \cdot l'_{\text{ЦТб}}}{G_T \cdot h_{\text{ЦТ}} + G_B \cdot h'_{\text{ЦТб}}}, \quad (4)$$

– при установке баллонов на крыше трактора:

$$\alpha''_{\text{limУК}} = \arctg \frac{(G_T + G_B) - G_T \cdot \bar{x} - G_B \cdot l''_{\text{ЦТб}}}{G_T \cdot h_{\text{ЦТ}} + G_B \cdot h''_{\text{ЦТб}}}, \quad (5)$$

3) для определения статического поперечного угла уклona трактора:

$$\beta_{\text{limУК}} = \arctg \frac{0,5 \cdot B \cdot (G_3 + G_B)}{G_T \cdot h_{\text{ЦТ}} + G_B \cdot h_{\text{ЦТб}}}, \quad (6)$$

где  $\bar{x}$  и  $h_{\text{ЦТ}}$  – горизонтальная и вертикальная координаты центра тяжести трактора соответственно, мм;

$h'_{G_6}$  и  $h''_{G_6}$  – плечи приложения силы тяжести баллонов  $\bar{G}_B$  при их установке над задней осью и на крыше трактора соответственно, мм;

$l'_{ЦГ6}$  и  $l''_{ЦГ6}$  – горизонтальная координата центра тяжести баллонов, установленных над задней осью и на крыше трактора, мм;  $l'_{ЦГ6} = 136$  мм;  $l''_{ЦГ6} = 1416$  мм;

$h'_{ЦГ6}$  и  $h''_{ЦГ6}$  – вертикальная координата центра тяжести баллонов, установленных над задней осью на крыше трактора соответственно, мм;  $h'_{ЦГ6} = 2135$  мм;  $h''_{ЦГ6} = 3598$  мм.

Результаты расчета предельных статических углов устойчивости трактора РТМ-160 представлены на рисунке 1.

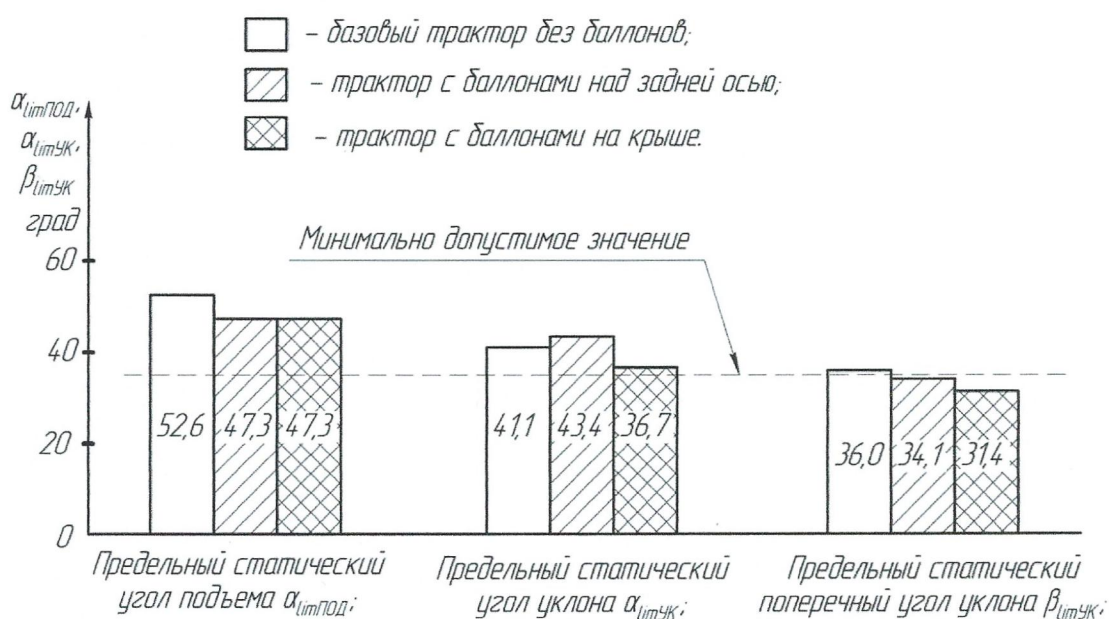


Рисунок 1 – Предельные статические углы устойчивости трактора РТМ-160 при различной компоновке газобаллонного оборудования

Как видно из диаграммы, представленной на рисунке 1, при переводе трактора РТМ-160 на газодизельный цикл баллоны наиболее целесообразно устанавливать над задней осью трактора, так как это практически не ухудшает устойчивость трактора.

Вследствие того, что трактор К-700А имеет шарнирно сочлененную раму, при которой имеется возможность относительного поворота полурам, до упора в ограничительные кронштейны две полурамы трактора ведут себя как две отдельные части.

С учетом сказанного рассмотрим равновесие машинно-тракторного агрегата (МТА), стоящего на подъеме (рисунок 2).



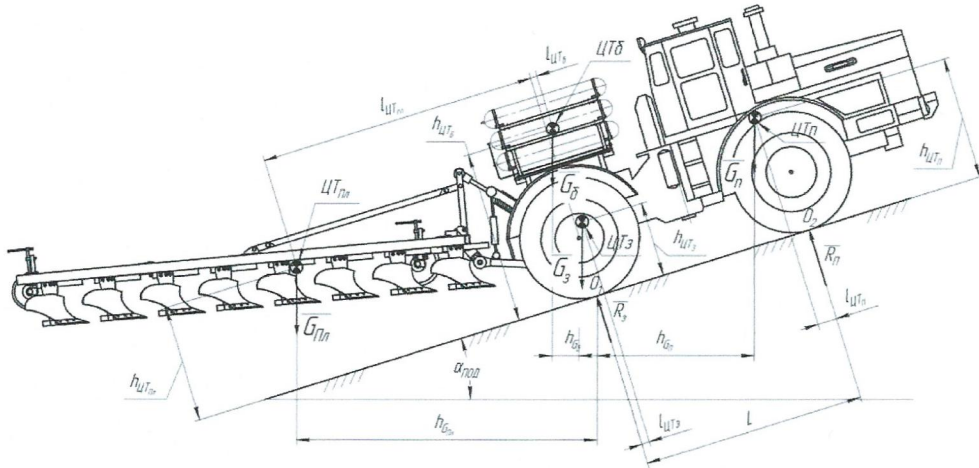


Рисунок 2 – Схема к определению предельного статического угла подъема машинно-тракторного агрегата

Для этого составим уравнение равновесия МТА относительно предполагаемой оси опрокидывания трактора (точка  $O_1$ ).

$$\sum M_{O_1}(F_i) = 0; \quad -G_{П} \cdot h_{ГП} + G_{З} \cdot h_{ГЗ} + G_{Б} \cdot h_{ГБ} + G_{Пл} \cdot h_{ГПл} + R_{П} \cdot L = 0, \quad (7)$$

где  $h_{ГП}$  – плечо приложения силы тяжести передней полурамы трактора  $\bar{G}_{П}$ , м;

$h_{ГЗ}$  – плечо приложения силы тяжести задней полурамы трактора  $\bar{G}_{З}$  (может принимать как положительные, так и отрицательные значения), м;

$h_{ГБ}$  – плечо приложения силы тяжести газобаллонной аппаратуры  $\bar{G}_{Б}$  (может принимать как положительные, так и отрицательные значения), м;

$h_{ГПл}$  – плечо приложения силы тяжести плуга  $\bar{G}_{Пл}$ , м;

$L$  – колесная база трактора, м;  $L = 3200$  мм.

В момент опрокидывания трактора реакция  $R_{П} = 0$ ; причем в этот момент угол подъема равен предельному статическому углу подъема ( $\alpha_{ПОД} = \alpha_{limПОД}$ ).

В результате преобразований получено выражение для определения предельного статического угла подъема трактора  $\alpha_{limПОД}$ :

$$\alpha_{limПОД} = \arctg \frac{G_{П} \cdot (L - l_{ЦТП}) + G_{З} \cdot l_{ЦТЗ} + G_{Б} \cdot l_{ЦТБ} - G_{Пл} \cdot l_{ЦТПл}}{G_{П} \cdot h_{ЦТП} + G_{З} \cdot h_{ЦТЗ} + G_{Б} \cdot h_{ЦТБ} + G_{Пл} \cdot h_{ЦТПл}}, \quad (8)$$

Для определения предельного статического угла уклона  $\alpha_{limУК}$  рассмотрим равновесие трактора, установленного на уклоне (рисунок 3).

Составим уравнение равновесия машинно-тракторного агрегата относительно предполагаемой оси опрокидывания трактора (точка  $O_2$ ).

$$\sum M_{O_2}(F_i) = 0; \quad -R_3 \cdot L - G_{П} \cdot h_{ГП} + G_{З} \cdot h_{ГЗ} + G_{Б} \cdot h_{ГБ} + G_{Пл} \cdot h_{ГПл} = 0, \quad (9)$$

Выражение для определения предельного статического угла уклона:

$$\alpha_{limУК} = \arctg \frac{G_{П} \cdot l_{ЦТП} + G_{З} \cdot (L - l_{ЦТЗ}) + G_{Б} \cdot (L - l_{ЦТБ}) + G_{Пл} \cdot (L + l_{ЦТПл})}{G_{П} \cdot h_{ЦТП} + G_{З} \cdot h_{ЦТЗ} + G_{Б} \cdot h_{ЦТБ} + G_{Пл} \cdot h_{ЦТПл}}, \quad (10)$$

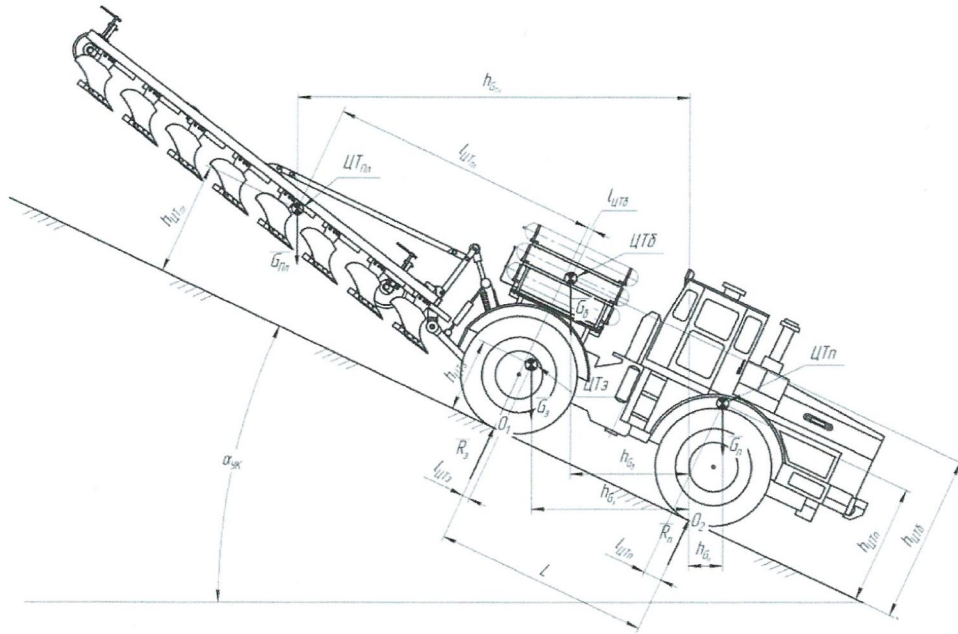


Рисунок 3 – Схема к определению предельного статического угла уклона машинно-тракторного агрегата

Поперечная устойчивость трактора с шарнирной рамой рассматривается как устойчивость сочлененной системы. Основное влияние на поперечную устойчивость в данном случае оказывают характер сочленения секций и ограничения их взаимного перемещения, зависящие от шарнира.

Ограничители, блокирующие шарнир, допускают поворот одной секции относительно другой на определенный угол. С момента смыкания упоров трактор с шарнирной рамой можно рассматривать как одно целое.

Для определения предельного статического угла поперечного уклона трактора рассматривали равновесие трактора, стоящего на уклоне. Первоначально, когда у трактора имеется возможность относительного поворота полурам (за счет шарнира), следует рассматривать равновесие передней и задней полурам в отдельности.

В связи с этим был проведен предварительный расчет поперечной устойчивости передней и задней полурам, который показал, что для передней полурамы предельный угол опрокидывания будет равен 28,8 град, а для задней – 35,4 град.

Поэтому для определения предельного значения угла поперечной устойчивости  $\beta_{lim}$  рассмотрим такое положение трактора, когда передняя полурама повернется относительно задней до упора (т. е. на угол  $\varphi_{доп} = 8^\circ$ ). При этом трактор с этого момента будем рассматривать как одно целое.

В результате этого было получено выражение для определения предельного статического угла уклона трактора:

$$\beta_{lim} = \arctg \frac{G_{П} \cdot (0,5 \cdot B \cdot \cos \varphi_{доп} - h_{ЦТн} \cdot \sin \varphi_{доп}) + 0,5 \cdot B \cdot (G_3 + G_Б + G_{Пл}) - G_{Пл} \cdot Y_{Пл}}{G_{П} \cdot (0,5 \cdot B \cdot \sin \varphi_{доп} + h_{ЦТн} \cdot \cos \varphi_{доп}) + G_3 \cdot h_{ЦТз} + G_Б \cdot h_{ЦТб} + G_{Пл} \cdot h_{ЦТпл}}, \quad (11)$$

Подставив в выражения (8), (10), (11) численные значения соответствующих параметров, получаем следующие значения предельных статических углов



опрокидывания. Результаты определения предельных статических углов опрокидывания трактора представлены в виде столбчатых диаграмм (рисунок 4).

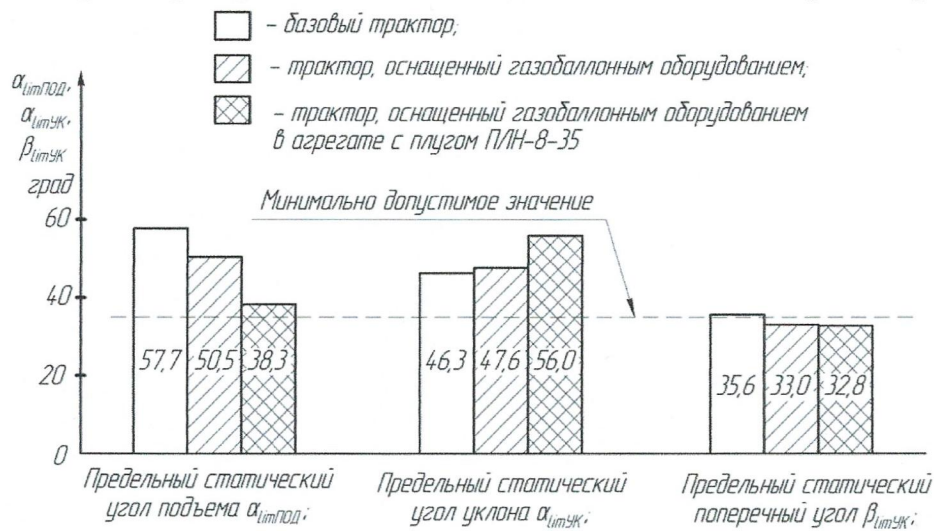


Рисунок 4 – Предельные статические углы опрокидывания трактора К-700А

Таким образом, как видно из рисунка 4, установка газобаллонного оборудования незначительно ухудшает устойчивость трактора, а в некоторых случаях (на уклоне) даже улучшает ее. Устойчивость трактора, оснащенного газобаллонным оборудованием, в составе машинно-тракторного агрегата с плугом ПЛН-8-35 в целом близка к требованиям ГОСТ 12.2.019-2005, регламентирующего устойчивость трактора без каких либо агрегатов. При этом использование плуга практически не влияет на устойчивость МТА на поперечном уклоне. Вследствие этого никаких противопоказаний к установке газового оборудования на трактор нет.

В третьем разделе «Общая методика исследования» представлены программа, общие и частные методики исследований, а также описаны приборы, которые применялись в ходе этих исследований.

Исследования проводились с использованием тракторов К-700А и РТМ-160, оснащенных газобаллонным оборудованием. На тракторах К-700А использовались микропроцессорная система управления подачей газа СЭРГ-500 производства ООО «ППП Дизельавтоматика» и система питания с распределенной подачей газообразного топлива по эжекционному принципу, разработанная СГАУ им. Н. И. Вавилова совместно с ООО «ППП Дизельавтоматика». Трактор РТМ-160 оснащался системой подачи газа производства ООО «НТЦ «Авангард».

Эксплуатационные исследования проводились в ГНУ НИИСХ Юго-Востока и ООО «Горизонт-С» Саратовской области в соответствии с ГОСТ 7057-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний» при выполнении основных сельскохозяйственных операций: пахоты, культивации, посева, дискования.

Определение силы тяги на крюке проводилось с использованием тензометрического комплекса, состоящего из накладных тензометрических датчиков, закрепленных на нижних тягах задней навески трактора.

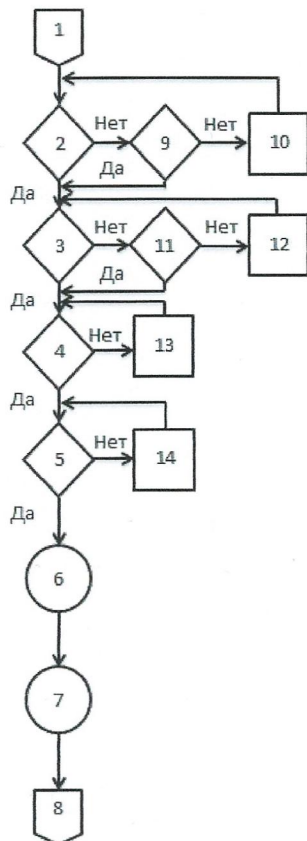
Экологические показатели дизеля при работе как по дизельному, так и по газодизельному циклам определялись с помощью газоанализатора «Автотест-01.02».

Настройка параметров и диагностика системы подачи газообразного топлива осуществлялись с использованием программного комплекса «Тракторинжект», разработанного ООО «ППП Дизельавтоматика», посредством СОМ-порта через промышленный интерфейс PS-232, позволяющий определить: частоту вращения коленчатого вала, угол опережения впрыскивания топлива, расход газообразного топлива, период открытия газовой форсунки и давление в газовом коллекторе.

**В четвертом разделе «Совершенствование технического обслуживания и техники безопасности при эксплуатации тракторов, оснащенных газобаллонным оборудованием»** представлены разработанный алгоритм технологии диагностирования, результаты экологических исследований и даны рекомендации по совершенствованию технического обслуживания и техники безопасности.

#### Алгоритм и технология диагностирования

Алгоритм диагностирования дизельного двигателя, оснащенного системой распределенной подачи газообразного топлива по эжекционному принципу, представлен на рисунке 5.



1. – проверка жесткости крепления оборудования;
2. – проверка потери давления газа в системе;
3. – проверка давления газообразного топлива в газовом коллекторе;
4. – проверка температурного режима работы дизеля;
5. – анализ стабильности поддержания частоты вращения коленчатого вала дизеля;
6. – анализ температуры и содержания токсичных веществ в отработанных газах;
7. – определение времени динамической реакции системы при работе по газодизельному циклу под нагрузкой;
8. – сдача трактора в эксплуатацию;
9. – герметичность заправочной арматуры;
10. – замена соединений производится на станции технического обслуживания;
11. – проверка давления создаваемого редуктором;
12. – замена и ремонт редуктора производится на станции технического обслуживания;
13. – ремонт системы охлаждения производится на станции технического обслуживания;
14. – корректировка коэффициентов ПИД-регулятора при помощи программного комплекса «Тракторинжект».

Рисунок 5 – Алгоритм диагностирования системы подачи газообразного топлива: – подготовительные операции; – операции диагностирования; – ремонтные операции; – последовательные операции.



На основании проведенных стендовых и эксплуатационных исследований тракторов РТМ-160 и К-700А были получены зависимости усилия трактора на крюке от расхода топлива и разработана карта диагностирования (таблица 1).

Таблица 1 – Карта диагностирования

Наименование диагностического параметра	Размерность	Значение параметра		Оборудование
		предельные	допустимые	
1. Затяжка креплений газовых баллонов, не менее	Н·м	50	62	Динамометрический ключ
2. Утечки газообразного топлива	–	Утечки не допускаются		Мыльный раствор, кисточка
3. Давление в газовом коллекторе, не менее	МПа	2,8	3,0	Датчик давления, индикатор системы подачи топлива
4. Температурный режим работы по газодизельному циклу, не более	°С	95	90	Датчик температуры дизеля и индикатор трактора
5. Стабильность поддержания частоты вращения, не более	%	5	2	Программный комплекс «Тракторинжект»
6. Содержание в отработавших газах углеводородов (СН) и оксидов азота (NO <sub>x</sub> )	%	1,4...1,56	1,0...1,4	Газоанализатор
7. Содержание в отработавших газах сажи	%	14,4...25,2	9,0...14,4	Газоанализатор
8. Реакция системы на изменение нагрузки на двигатель, не более	с	5	2	Программный комплекс «Тракторинжект»

#### *Результаты экологических исследований при эксплуатации тракторов*

Результаты проведенных исследований по определению экологических показателей при эксплуатации трактора К-700А, оснащенного эжекционной системой подачи газообразного топлива, представлены на рисунке 6.

В процессе исследований отмечено улучшение основных показателей токсичности при переводе дизеля на газодизельный цикл. В первую очередь это относится к дымности ОГ, уменьшающейся во всем диапазоне нагрузочных режимов работы дизеля. Так, на режиме с  $N_e = 152$  кВт при  $n = 2100$  мин<sup>-1</sup> дымность снижается с 63 до 40 %. На номинальном режиме отмечается жесткое сгорание топлива и, как следствие, увеличение выброса оксидов азота. На других

нагрузочных режимах работы газодизеля содержание  $\text{NO}_x$  в его ОГ меньше, чем у двигателя, работающего только на дизельном топливе. В то же время отмечено увеличение эмиссии углеводородов  $\text{CH}_x$  и монооксида углерода  $\text{CO}$ . Большие выбросы  $\text{CH}_x$  особенно характерны для режимов работы газодизеля с малыми нагрузками и большим коэффициентом избытка воздуха. Это объясняется неполнотой сгорания газового топлива в газодизельном режиме при работе на бедных смесях. На этих режимах отмечено и ухудшение топливной экономичности.

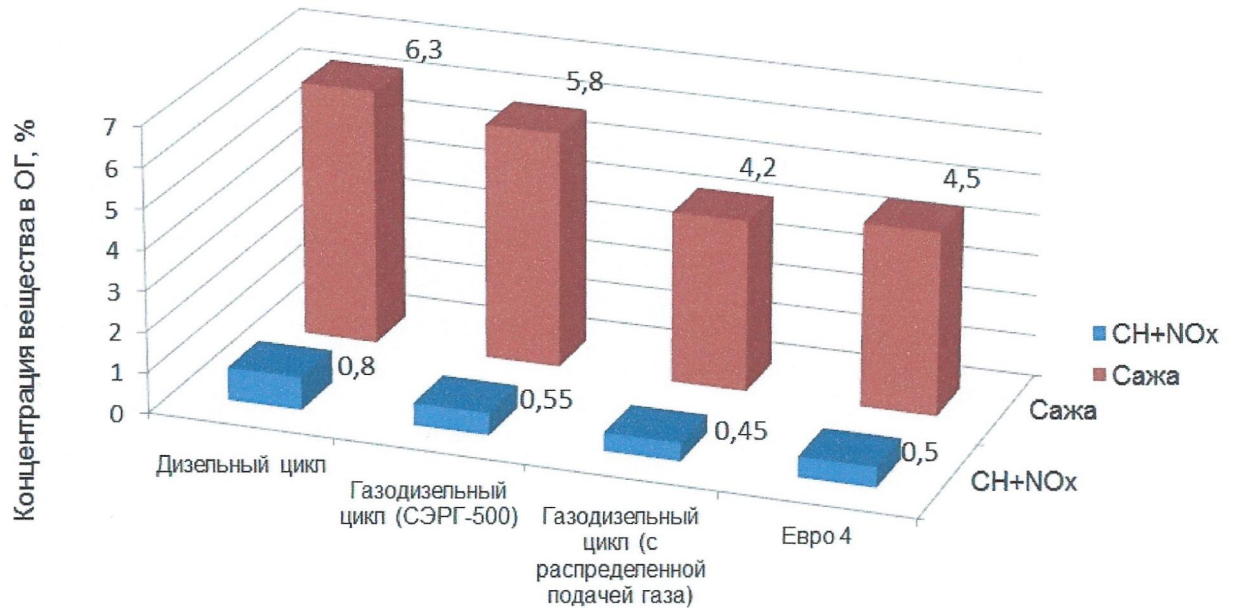


Рисунок 6 – Содержание вредных выбросов в отработавших газах двигателя ЯМЗ-238НДЗ трактора К-700А

Таким образом, результаты испытаний показали целесообразность перехода на дизельный цикл на режимах малых нагрузок и холостого хода с целью уменьшения выбросов углеводородов и расхода топлива. Исследования также показали, что для улучшения показателей работы двигателя по газодизельному циклу необходимы оптимизация состава горючей смеси на всех режимах, управление моментом впрыскивания (УОВТ), запальной дозы дизельного топлива, а также подбор и регулирование фаз газораспределения. В результате анализа полученных данных можно сделать вывод, что экологическая эффективность разработанной системы с распределенной подачей газа по эжекционному принципу превышает экологическую эффективность системы с центральной подачей газа типа СЭРГ-500: по содержанию  $\text{NO}_x$  на 20 %,  $\text{CH}_x$  – на 30 %,  $\text{CO}$  – на 10 %, при этом  $\text{CO}_2$  увеличилось на 30 %, а коэффициент задымленности снизился на 15 % за счет оптимизации процессов горения газообразного топлива. Данные значения показывают, что переход дизеля на работу по газодизельному циклу позволяет по нормам выбросов токсичных газов соответствовать стандарту ЕВРО-4, введенному с 2005 года.

Определение экологических показателей двигателя ЯМЗ-236Д, установленного на трактор РТМ-160 и работающего по газодизельному циклу, проводилось газоанализатором ДАГ-16. Установлено, что произошло уменьшение



вредных выбросов по сравнению с дизельным циклом в среднем: CO – на 21 %; NO – на 8,7 %; NO<sub>2</sub> – на 14 %; CO<sub>2</sub> – на 10 %; сажи – на 35 %.

*Методика и результаты эксплуатационных исследований статических углов трактора К-700А с навесным плугом*

В данном разделе представлена методика для определения расположения координат центров тяжести каждой полурамы в отдельности, которая базируется на положениях ГОСТ 30750-2001. Схема испытания для определения координат центра тяжести передней полурамы приведена на рисунке 7, а.

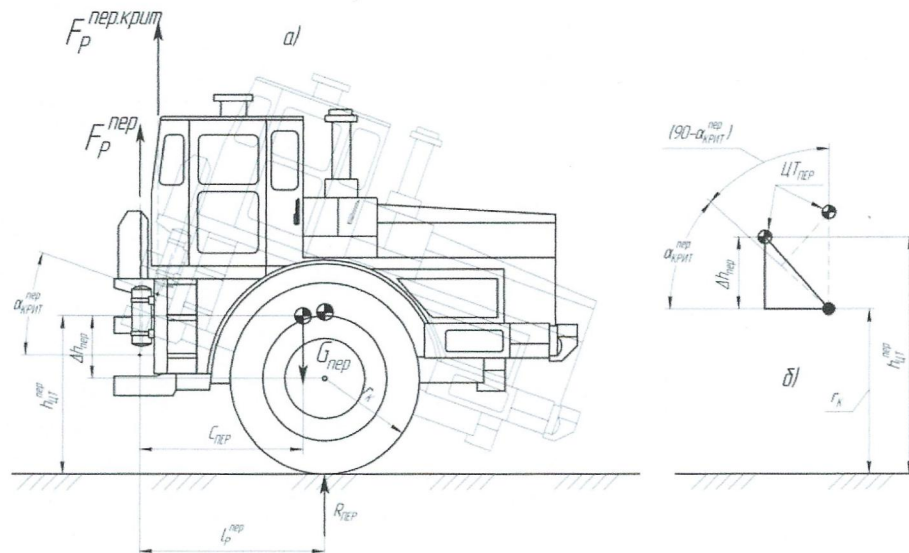


Рисунок 7 – Схема к определению центра тяжести передней полурамы: а – схема испытания; б – расчетная схема

Для определения координат центра тяжести передней полурамы трактора колеса передней полурамы устанавливают на платформы переносных автомобильных весов. После этого место сочленения шарнира передней полурамы трактора подвешивают на стропах крана, регистрируя при этом усилие  $F_p^{\text{пер}}$  на этих стропах при помощи динамометра ДПУ-20-1. При этом горизонтальная координата расположения центра тяжести передней полурамы  $C_{\text{пер}}$  может быть определена из выражения (рисунок 7, б):

$$C_{\text{пер}} = \frac{R_{\text{пер}} \cdot l_{\text{Р}}^{\text{пер}}}{G_{\text{пер}}}, \quad (12)$$

где  $R_{\text{пер}}$  – реакция со стороны платформ весов на колеса передней полурамы трактора в горизонтальном положении, Н;

$l_{\text{Р}}^{\text{зад}}$  – расстояние от оси переднего моста до оси шарнира поворота трактора, мм;

$G_{\text{пер}}$  – вес передней полурамы трактора, Н.

Для определения вертикальной координаты положения центра тяжести передней полурамы необходимо поднимать стропы крана (при этом будет происходить поворот полурамы относительно центра колес) до того момента, пока показания динамометра не будут равны нулю. Полученный таким образом

угол является так называемым критическим углом наклона, при котором будет наблюдаться равновесное состояние. Положение вертикальной координаты центра тяжести передней полурамы трактора (рисунок 7, б) определится выражением:

$$h_{\text{ЦТ}}^{\text{пер}} = r_{\text{к}} + (l_{\text{Р}}^{\text{пер}} - C_{\text{пер}}) \cdot \text{tg}(90 - \alpha_{\text{КРИТ}}^{\text{пер}}), \quad (13)$$

где  $r_{\text{к}}$  – статический радиус колеса, мм;

$\alpha_{\text{КРИТ}}^{\text{пер}}$  – критический угол наклона передней полурамы, при котором линия действия силы тяжести  $\bar{G}_{\text{ПЕР}}$  пересекается с передней осью трактора, град; при этом  $F_{\text{Р}}^{\text{ПЕР.КРИТ.}} = 0$ .

Таким же образом можно получить координаты центра тяжести задней полурамы трактора согласно рисунку 8:

$$C_{\text{зад}} = \frac{R_{\text{зад}} \cdot l_{\text{Р}}^{\text{зад}}}{G_{\text{зад}}}, \quad (14)$$

где  $R_{\text{зад}}$  – реакция со стороны платформ весов на колеса задней полурамы трактора в горизонтальном положении, Н;

$l_{\text{Р}}^{\text{зад}}$  – расстояние от оси заднего моста до оси шарнира поворота трактора, мм;

$G_{\text{зад}}$  – вес задней полурамы трактора, Н;

$m_{\text{зад}}$  – масса задней полурамы трактора, кг.

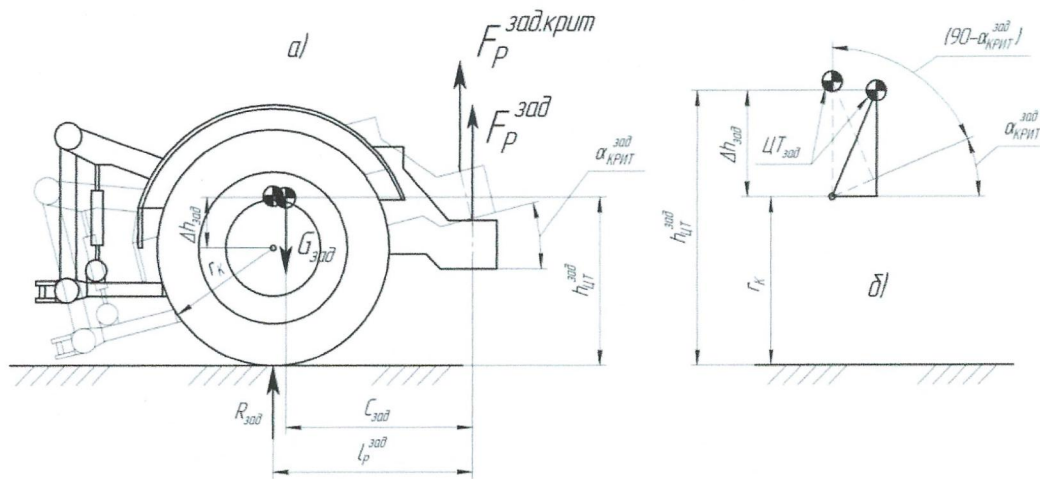


Рисунок 8 – Схема к определению центра тяжести задней полурамы: а – схема испытания; б – расчетная схема

Для определения вертикальной координаты положения центра тяжести задней полурамы поднимают стропы крана до того момента, пока показания динамометра не будут равны нулю. Положение вертикальной координаты центра тяжести задней полурамы трактора определится выражением:

$$h_{\text{ЦТ}}^{\text{зад}} = r_{\text{к}} + (l_{\text{Р}}^{\text{зад}} - C_{\text{зад}}) \cdot \text{tg}(90 - \alpha_{\text{КРИТ}}^{\text{зад}}), \quad (15)$$

где  $\alpha_{\text{КРИТ}}^{\text{зад}}$  – критический угол наклона задней полурамы, при котором линия действия силы тяжести  $\bar{G}_{\text{ЗАД}}$  пересекается с передней осью трактора, град; при этом  $F_{\text{Р}}^{\text{ЗАД.КРИТ.}} = 0$ .



В процессе исследований были получены значения координат центров тяжести полурам трактора, показанные на рисунках 7 и 8:

$$- C_{\text{пер}} = 1340 \text{ мм}; h_{\text{ЦГ}}^{\text{пер}} = 1356 \text{ мм};$$

$$- C_{\text{зад}} = 1547 \text{ мм}; h_{\text{ЦГ}}^{\text{зад}} = 975 \text{ мм}.$$

Для подтверждения результатов теоретических изысканий были проведены соответствующие исследования (в соответствии с ГОСТ 7057-2001) по практическому определению предельных статических углов устойчивости тракторов.

В ходе данных исследований трактор (МТА) устанавливался на специальную платформу размером 8×4 м. Трактор и платформа были подготовлены в соответствии с вышеуказанным стандартом. В дальнейшем платформа при помощи подъемного крана поднималась в соответствующем направлении до момента отрыва колес трактора от платформы. Соответствующий этому моменту угол являлся предельным статическим углом опрокидывания.

Результаты проведенных экспериментов в сравнении с теоретическими данными представлены в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Сводная таблица определения статических углов продольной и поперечной устойчивости трактора К-700А, оснащенного газобаллонным оборудованием в агрегате с плугом ПЛН-8-35

Комплектация		Предельный статический угол подъема $\alpha_{\text{limПЮД}}$	Предельный статический угол уклона $\alpha_{\text{limУК}}$	Предельный статический угол поперечной устойчивости $\beta_{\text{limУК}}$
Трактор без плуга и газобаллонного оборудования	теорет., град	57,7	46,3	35,6
	экспер., град	56,0	46,0	35,0
	$\delta$ , %	2,9	0,6	1,7
Трактор, оснащенный газобаллонным оборудованием, без плуга	теорет., град	50,5	47,6	33,0
	экспер., град	49,0	48,0	33,0
	$\delta$ , %	3,0	0,8	0
Трактор, оснащенный газобаллонным оборудованием, в агрегате с плугом	теорет., град	38,3	56,0	32,8
	экспер., град	37,0	54,0	32,0
	$\delta$ , %	3,4	3,6	2,4

Как показал проведенный эксперимент, значения предельных статических углов опрокидывания, полученные экспериментальным путем и посредством аналитических расчетов довольно близки. Расхождение не превышает 3,6 % (таблица 2). Это является подтверждением правильности проведенных теоретических расчетов.

С целью обеспечения безопасности при проведении технического обслуживания тракторов с газобаллонным оборудованием был проведен расчет и разработан план участка для проведения ТО, учитывающий использование газомоторного топлива. На основании полученных данных помещения участков для проведения ТО относятся к категории А. В связи с этим помещения необходимо дооборудовать аварийной системой вентиляции с 8-кратным воздухообменом и датчиками загазованности. Кроме этого необходимо использовать взрывозащищенное оборудование и искробезопасные инструменты. Также разработаны рекомендации по совершенствованию технического обслуживания газобаллонных тракторов.

В пятом разделе *«Расчет экономической эффективности работы тракторов, работающих в газодизельном цикле»* представлен расчет экономической эффективности использования газомоторного топлива, в ходе которого было установлено, что величина нормативных плат за выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду по сравнению с дизельным топливом снижается в два раза. При использовании газомоторного топлива в тракторах тягового класса 50 кН, с учетом дополнительных затрат на техническое обслуживание и мероприятия по технике безопасности, годовой экономический эффект составил 138,9 тыс. руб. Проведенный расчет и анализ затрат при использовании различных топлив (дизельного топлива, компримированного природного газа, сжиженного нефтяного газа и смесового биотоплива) показал, что наибольший экономический эффект достигается при использовании природного газа – метана.

#### **Заключение**

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований определены статические углы подъема трактора К-700А, оснащенного газобаллонным оборудованием с навесным плугом. Установлено, что предельные статические углы устойчивости обеспечивают безопасную эксплуатацию трактора. Разработаны алгоритм и технология диагностирования системы подачи газообразного топлива. Дополнены рекомендации по техническому обслуживанию.

2. Получены аналитические выражения, учитывающие особенности тракторов с шарнирно сочлененной рамой, позволяющие определить предельные статические углы устойчивости трактора К-700А, оснащенного газобаллонным оборудованием, с навесным плугом ПЛН-8-35; предельные статические углы подъема, уклона и поперечного уклона составили соответственно 38,3; 56,0; 32,8 град, что свидетельствует о том, что устойчивость трактора близка к требованиям стандарта безопасности. Для подтверждения аналитических данных разработана методика, которая базируется на положениях стандартной методики определения предельных статических углов устойчивости; результаты, полученные в ходе исследований по данной методике, имеют расхождение с аналитическими данными не более чем на 3,6 %, что свидетельствует о достоверности полученных данных. Для трактора РТМ-160 проведен анализ расположения газовых баллонов на



крыше и над задней осью, который показал, что наиболее целесообразно для данного трактора газовые баллоны расположить над задней осью.

3. Разработаны алгоритм, технология и карта диагностирования тракторных двигателей, оснащенных газобаллонным оборудованием. Установлены допустимые предельные значения основных показателей: давление в газовом коллекторе 2,8-3,0 МПа; температурный режим работы 95-70 °С; затяжка гаек крепления газовых баллонов 50-62 Н·м.

Предложена методика использования программного обеспечения «Тракторинжект», позволяющего диагностировать следующие параметры: напряжение питания постоянного тока; давление газа на входе в электромагнитную газовую форсунку; номинальную цикловую подачу газа; минимальную цикловую подачу газа.

4. Предложены рекомендации по совершенствованию техники безопасности и технического обслуживанию тракторов при использовании газобаллонного оборудования. Уточнены требования к участку технического обслуживания.

5. Эксплуатационными испытаниями подтверждено, что вредные выбросы тракторных дизелей, работающих по газодизельному циклу, значительно снижаются при использовании системы распределенной подачи газообразного топлива по эжекционному принципу по сравнению с дизельным циклом и серийно выпускаемой системой с центральной подачей газа СЭРГ-500 установлено снижение содержания  $\text{NO}_x$  на 20 %,  $\text{CH}_x$  – на 30 %,  $\text{CO}$  – на 10 %, а содержание  $\text{CO}_2$  повысилось на 30 %, что в целом соответствует требованиям ЕВРО-4.

6. Проведенный технико-экономический анализ показал, что нормативные платы за выбросы загрязняющих веществ при использовании газомоторного топлива снижаются в 2 раза по сравнению на дизельном топливе, а за счет снижения расхода дизельного топлива (вследствие замещения его газом) годовой экономический эффект при эксплуатации трактора К-700А составляет 138880 руб.

### **Рекомендации производству**

1. Посты технического обслуживания тракторов с газобаллонным оборудованием необходимо дооборудовать с учетом особенностей эксплуатации данного оборудования согласно требований пожарной безопасности для предприятий, эксплуатирующих автотранспортные средства на компримированном газе, предъявляемых к помещениям категории А по взрыво- и пожароопасности.

2. При диагностировании систем подачи газообразного топлива следует использовать программное обеспечение «Тракторинжект», которое позволяет в полном объеме получить информацию о техническом состоянии системы и проводить при необходимости корректировку параметров ее работы.

3. Использование природного газа – метана – в качестве топлива для тракторных дизелей по экономическим показателям целесообразнее применения биотоплива и дизельного топлива.



### Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Разработать рекомендации по размещению заправочных станций (АГНКС) с учетом парка машин, оснащенных газобаллонным оборудованием.
2. Усовершенствовать устройства для заправки природным газом на заправочных пунктах и непосредственно в поле.
3. Провести ресурсные испытания тракторных двигателей, работающих на компримированном природном газе.

### Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

#### *В изданиях рекомендованных ВАК РФ:*

1. **Нигматулин, И. Д.** Сравнительные характеристики экологических показателей двигателя ЯМЗ-236Д при работе по дизельному и газодизельному циклу [Текст] / Б. П. Загородских, А. А. Жиздюк, И. Д. Нигматулин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2007. – № 3. – С. 35–37.
2. **Нигматулин, И. Д.** Экологические показатели трактора РТМ-160, работающего по дизельному и газодизельному циклам [Текст] / Б. П. Загородских, Е. В. Бебенин, И. Д. Нигматулин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2009. – № 1. – С. 47–49.
3. **Нигматулин, И. Д.** Особенности техники безопасности и технического обслуживания тракторов, оснащенных газовым оборудованием [Текст] / Б. П. Загородских, В. В. Володин, И. Д. Нигматулин, И. М. Коростышевский // Труды ГОСНИТИ. Т. 107; часть 1. – М., 2011. – С. 105–109.
4. **Нигматулин, И. Д.** Устойчивость тракторов РТМ-160 при работе в газодизельном цикле [Текст] / Б. П. Загородских, Ю. А. Коцарь, В. В. Володин, И. Д. Нигматулин // Транспорт на альтернативном топливе. – М., 2011 – № 3(21). – С. 45–47. – ISSN 2073-1329.
5. **Нигматулин, И. Д.** К вопросу диагностики работы топливной системы питания дизельных двигателей газообразным топливом при работе по газодизельному циклу [Текст] / В. В. Володин, Б. П. Загородских, Е. В. Бебенин, И. Д. Нигматулин. // Труды ГОСНИТИ, т. 110; часть 1. – М., 2012. – С. 52-58.
6. **Нигматулин, И. Д.** Методика определения устойчивости трактора [Текст] С. В. Абрамов, И. Д. Нигматулин, В. В. Володин, Б. П. Загородских // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2014. – № 1. – С. 48–50. – ISSN 1998-6548.

#### *В материалах конференций и семинаров:*

7. **Нигматулин, И. Д.** Перспективы развития газа [Текст] / Б. П. Загородских, И. Д. Нигматулин // Актуальные проблемы проектирования и строительства объектов в АПК России: Сб. науч. тр. / ФГУП НИПИ Гипропромсельстрой. – Саратов, 2007. – С. 189–191.
8. **Нигматулин, И. Д.** Техника безопасности системы трактора РТМ-160 переоборудованного для работы по газодизельному циклу [Текст] / Б. П. Загородских, А. А. Жиздюк, И. Д. Нигматулин. // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания: матер. Междунар. науч. семинара. – Саратов, 2008. – Вып. 17 – С. 204–207.



9. **Нигматулин, И. Д.** Определение компоновочной схемы трактора РТМ-160, работающего по газодизельному циклу/ Б. П. Загородских, В. В. Володин, И. Д. Нигматулин / Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания: матер. Междунар. науч. семинара. – Саратов, 2010. – Вып. 19 – С. 41–44.

10. **Нигматулин, И. Д.** Использование программного обеспечения при диагностировании работы двигателя по газодизельному циклу при проведении эксплуатационных испытаний / В. В. Володин, И. Д. Нигматулин // Проблемы эксплуатации и ремонта автотракторной техники: матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Г. П. Шаронова. – Саратов: КУБиК. – 2010. – С. 53–56. – ISSN 978-5-91818-273-4.