

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ ЯМЗ-238, РАБОТАЮЩЕГО ПО ГАЗОДИЗЕЛЬНОМУ ЦИКЛУ

*Аль-Майди Али Аббас Хашим<sup>1</sup>*

*аспирант кафедры «Агроинженерия» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»*

*Чернецов Дмитрий Александрович<sup>2</sup>*

*к.т.н., доцент кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»*

**Ключевые слова:** газодизель, сельское хозяйство, компримированный природный газ, машинно-тракторный парк, токсичность отработавших газов, экономичность.

**Аннотация:** Приведены методика и оборудования для проведения экспериментальных исследований системы подачи топлива для двигателя ЯМЗ-238, работающего по газодизельному циклу. Представлены результаты проведенных испытаний на нагрузочном стенде, зависимости, полученные в ходе экспериментальных исследований, проведен их анализ. На основании построенных графических зависимостях сделаны выводы.

**Keywords:** gas diesel, agriculture, compressed natural gas, machine-tractor park, toxicity of exhaust gases, economy.

**Summary:** The procedure and equipment for carrying out experimental studies of fuel supply system for ЯМЗ-238 engine operating on gas-diesel cycle are given. The results of the tests carried out on the load bench, the dependencies obtained dur-

ing the experimental studies are presented, their analysis is carried out. Based on the built graphic dependencies, conclusions are drawn.

В последние десятилетия прослеживается тенденция расширения области применения компримированного природного газа в качестве моторного топлива, как в России, так и во всем мире.

В России машинно-тракторный парк со сроком эксплуатации более 10 лет по экологическому классу, как правило, соответствует Евро 0: такие сельскохозяйственные машины, имеют выбросы загрязняющих веществ в 5-10 раз больше, чем техника с экологическим классом Евро 3 и выше [1]. Таким образом, парк тракторов и комбайнов сельского хозяйства страны наносит экологический ущерб: выбросы отработавших газов, неэкономичное использование природных ресурсов нефтяного происхождения, а также материальных ресурсов. Поэтому масштабно ведутся работы по переводу машинно-тракторного парка на альтернативные виды топлива, а преимущественно на газовые.

Применение компримированного природного газа (КПГ) в качестве моторного топлива на сельскохозяйственной технике, основная масса которой работает на дизельных двигателях, возможна двумя способами: конвертацией (то есть перевод на газ с установкой искрового зажигания и изменением степени сжатия) и газодизелем (при котором используется запальная доза дизельного топлива) [2].

В связи с тем, что конвертация дизельного двигателя требует глобальных и трудоемких работ по модернизации элементов шатунно-поршневой группы и головки блока цилиндров, большее распространение получили двигатели, работающие по газодизельному циклу [3]. Поэтому их исследование и совершенствование, направленное на повышение экологичности и экономичности, имеет мировое значение.

Для проведения экспериментальных исследований на базе Военного учебно-научного центра «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» г. Воронеж применяли нагрузочный испытатель-

ный стенд «Газмотор-Комплект» г. Рыбинск, представленный на рисунке 1.



Рисунок 1 – Нагрузочный испытательный стенд с двигателем ЯМЗ-238, работающим по газодизельному циклу

Целью исследований является проверка математической модели процесса теплообмена в топливных магистралях, как газового, так и жидкого топлив, протекающих в газодизельных двигателях, используемых в сельском хозяйстве, обоснование параметров системы топливоподачи газодизельного двигателя и определение зависимостей эффективности работы системы.

В Тамбовском Государственном Техническом Университете (ТГТУ) на кафедре «Механика и Инженерная графика» разработана система подачи топлива двигателям, работающим по газодизельному циклу [4].

Изучение зависимостей изменения топливных показателей газодизеля ЯМЗ-238 с экспериментальной системой топливоподачи с установленным комбинированным устройством снижения токсичности (КУСТ) и без него при изменении нагрузочных режимов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) позволяет оценить воздействие на эксплуатационные показатели дизеля (тяговые, топливной экономичности и др.) [5-7].

На рисунках 2, 3 и 4 представлены зависимости расхода топлива, давления ОГ и температуры ОГ от используемой мощности ДВС.



Рисунок 2 – Зависимость расхода топлива от используемой мощности ДВС

В результате обработки данных получены уравнения регрессии:

- без КУСТ  $G_T(N) = 10,952 - 0,027 \cdot x + 1,291 \cdot 10^{-3} \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $G_T^{KUST}(N) = 10,845 - 0,021 \cdot x + 1,271 \cdot 10^{-3} \cdot x^2$ .

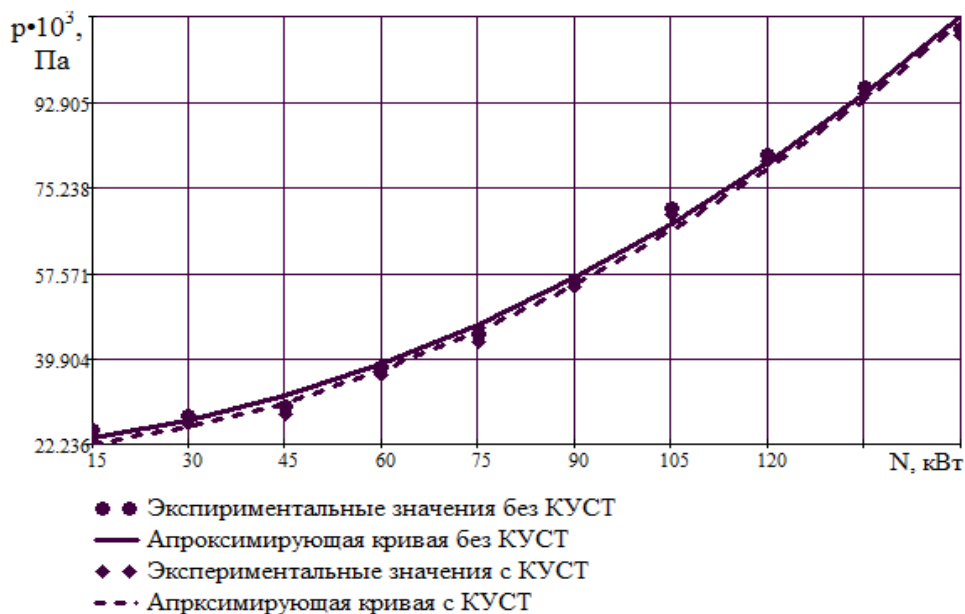


Рисунок 3 – Зависимость давления ОГ от используемой мощности ДВС

Уравнения регрессии зависимости давления ОГ от используемой мощности ДВС имеют вид:

- без КУСТ  $p_{OG}(N) = 21720 + 79,747 \cdot x + 3,418 \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $p_{OG}^{KUST}(N) = 20290 + 78,293 \cdot x + 3,431 \cdot x^2$ .



Рисунок 3 – Зависимость температуры ОГ от используемой мощности ДВС

Уравнения регрессии имеют вид:

- без КУСТ  $T_{ог}(N) = 178,975 + 4,643 \cdot x - 7,722 \cdot 10^{-3} \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $T_{ог}^{КУСТ}(N) = 225,883 + 3,91 \cdot x - 3,094 \cdot 10^{-3} \cdot x^2$ .

На низких нагрузках мощность не снижается до уровня, который соответствует температуре текущего расхода топлива, а периодически устанавливается на значение достаточном для накопления термической энергии в термоаккумуляторе [8, 9].

На рисунках 4-7 представлены полученные зависимости токсичных компонентов от мощности ДВС, при работе по газодизельному циклу.

Анализ изменения концентрации оксида углерода (CO) (рисунок 4) показывает, что с ростом мощности концентрация CO увеличивается с  $0,092 \text{ г/м}^3$  до  $0,303 \text{ г/м}^3$  за счёт неполноты сгорания топлива и снижения продолжительности процесса. Концентрация оксидов углерода на выходе КУСТ ниже на 15-57%, чем на входе, особенно в области высоких нагрузок двигателя и при больших температурах ОГ, что способствует лучшему сгоранию оксидов углерода.

После обработки данных получены уравнения регрессии:

- без КУСТ  $C_{CO}(N) = 0,079 + 7,986 \cdot 10^{-4} \cdot x + 4,529 \cdot 10^{-6} \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $C_{CO}^{КУСТ}(N) = 0,083 + 1,209 \cdot 10^{-4} \cdot x + 1,246 \cdot 10^{-6} \cdot x^2$ .

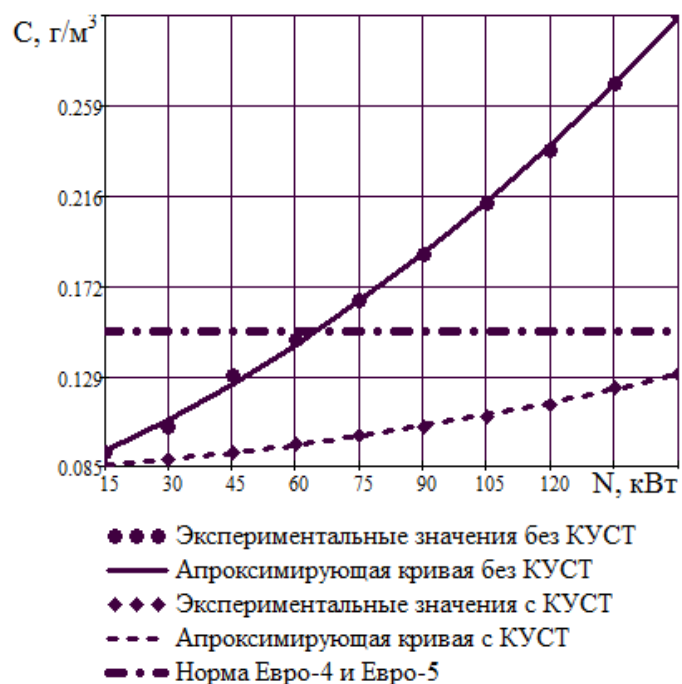


Рисунок 4 – Зависимость концентрации СО в ОГ от используемой мощности двигателя

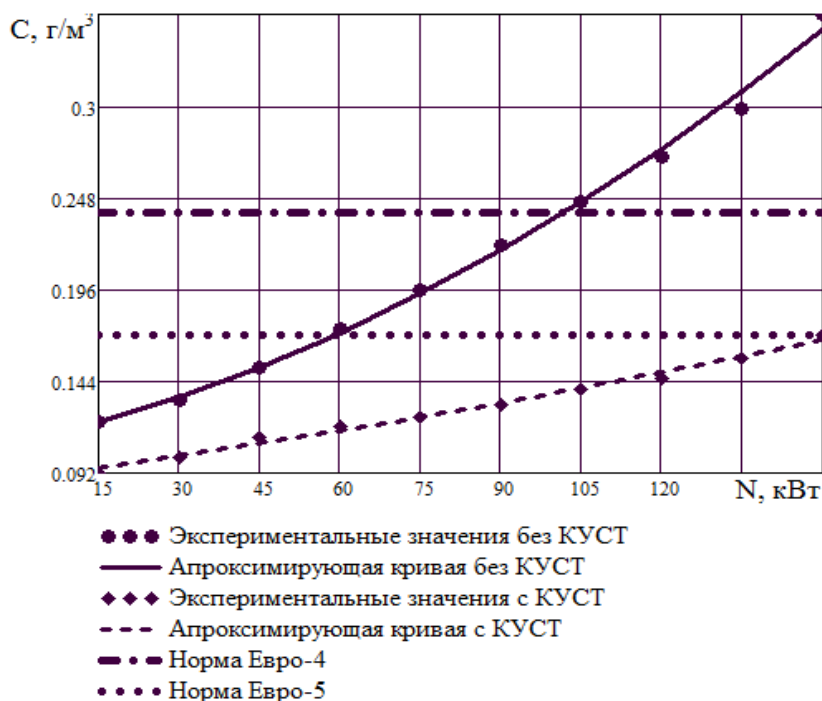


Рисунок 5 – Зависимость концентрации NO<sub>x</sub> в ОГ от используемой мощности двигателя

Уравнения регрессии имеют вид:

- без КУСТ  $C_{NO_x}(N) = 0,11 + 6,75 \cdot 10^{-4} \cdot x + 5,875 \cdot 10^{-6} \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $C_{NO_x}^{КУСТ}(N) = 0,088 + 4,307 \cdot 10^{-4} \cdot x + 6,566 \cdot 10^{-7} \cdot x^2$ .

Анализ изменения концентрации оксидов азота (рисунок 5) показывает, что с ростом нагрузки на ДВС их концентрация возрастает практически линейно и имеет наибольшее значение при максимальной нагрузке, причём на режимах высокой нагрузки концентрация  $\text{NO}_x$  увеличивается более резко. Это связано с тем, что с увеличением мощности ДВС и уменьшении коэффициента избытка воздуха происходит недожог топлива, что способствует образованию оксидов азота. Из рисунка 5 следует, что КУСТ ОГ более эффективно работает при нагрузках более 40%.

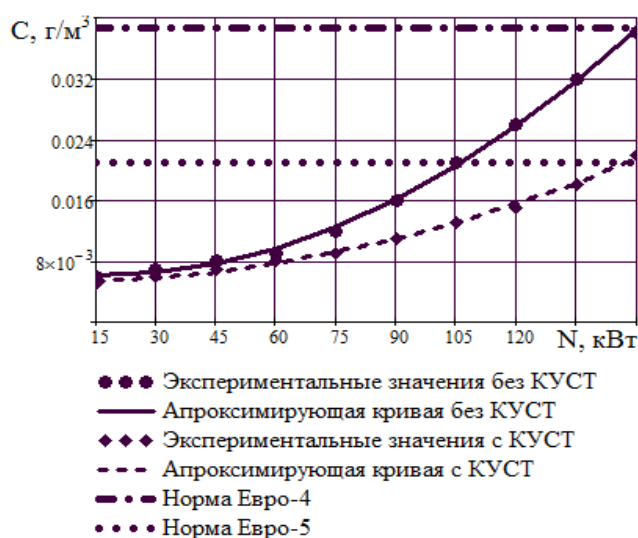


Рисунок 6 – Зависимость концентрации углеводородов в ОГ от используемой мощности двигателя

Уравнения регрессии имеют вид:

$$\text{- без КУСТ } C_{CH}(N) = 6,567 \cdot 10^{-3} - 5,485 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1,785 \cdot 10^{-6} \cdot x^2;$$

$$\text{- с КУСТ } C_{CH}^{КУСТ}(N) = 5,35 \cdot 10^{-3} - 6,212 \cdot 10^{-6} \cdot x + 7,576 \cdot 10^{-7} \cdot x^2.$$

Из рисунка 6 видно, что концентрация углеводородов в ОГ при повышении нагрузки на двигатель возрастает от 0,006 г/м³ до 0,038 г/м³, то есть выбросы СН на максимальной мощности в шесть раз больше, чем на минимальной нагрузке. Такой характер зависимости объясняется увеличением расхода топлива, и, соответственно, повышением количества углеводородов, выделяющихся при сгорании топлива в камере сгорания.

Анализ зависимости (рисунок 7) показывает, что с увеличением нагрузки

на ДВС концентрация сажи в ОГ возрастает практически линейно. Это связано с недогоранием топлива в камере сгорания. Концентрация сажи увеличивается с 0,007 до 0,031 г/м<sup>3</sup> (в 4,5 раза) без КУСТ и с 0,002 до 0,007 (в 3,5 раза) с КУСТ. На выходе КУСТ в зависимости от увеличения нагрузки концентрация сажи изменяется в меньшем диапазоне, так как в зоне высоких температур сажа лучше сгорает.

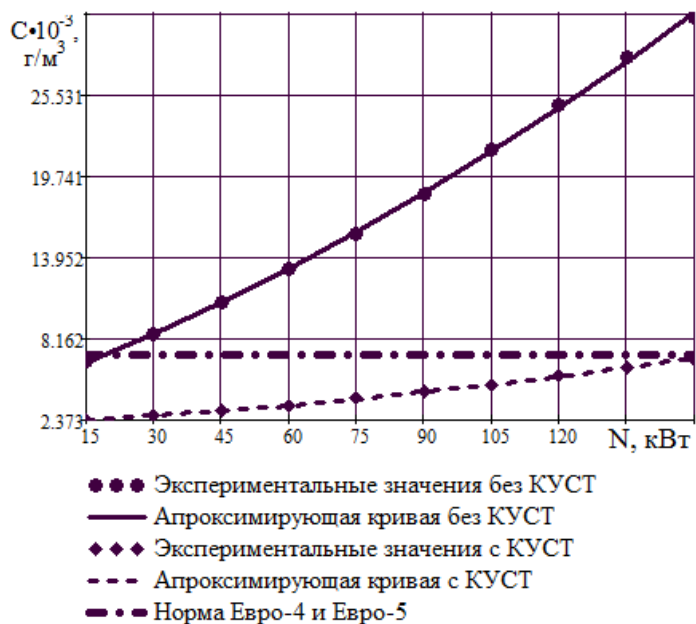


Рисунок 7 – Зависимость концентрации сажи в ОГ от мощности ДВС

Уравнения концентрации сажи от нагрузки ДВС имеют вид:

- без КУСТ  $C_c(N) = 4,587 \cdot 10^{-3} + 1,196 \cdot 10^{-4} \cdot x + 3,906 \cdot 10^{-7} \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $C_c^{КУСТ}(N) = 2,1 \cdot 10^{-3} + 1,677 \cdot 10^{-5} \cdot x + 9,428 \cdot 10^{-8} \cdot x^2$ .

Таблица 1 – Сравнение содержания вредных веществ в ОГ с нормами

Токсичный компонент	Нормативы			ДВС ЯМЗ-238	
	Евро-III	Евро-IV	Евро-V	Без КУСТ	С КУСТ
СО, г/кВт·ч	2,10	1,50	1,50	3,71	1,48
СН, г/кВт·ч	0,66	0,46	0,26	0,46	0,25
NO <sub>x</sub> , г/кВт·ч	5,00	3,50	2,00	4,31	1,94
С, г/кВт·ч	0,127	0,08	0,08	0,38	0,076



Анализируя таблицу 1 можно сказать, что применение нейтрализатора ОГ позволяет выполнять нормы Евро-V по всем токсичным компонентам [10]. Средняя степень очистки ОГ от вредных веществ составляет: по CO – 60%, по CH – 45%, по NO<sub>x</sub> – 55% и по саже – 80%.

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

1. Решена задача сохранения мощностных характеристик газодизельного двигателя на уровне дизельного прототипа ЯМЗ-238:  $M_e=880\text{Н}\cdot\text{м}$  при 1300 мин<sup>-1</sup>. Расчетные максимальные давления и температура цикла в газодизельном двигателе не превышают их значения в дизеле и составляют  $P_{\max}=10,7$  МПа,  $T_{\max}=1864$  К.
2. Обеспечены показатели токсичности выпускных газов, соответствующие нормам Евро-2 без каталитического нейтрализатора, а с его применением достигается характеристика токсичности, отвечающая нормам Евро-5.

#### Список используемых источников

1. Al-Maidi, A.A.H. Analysis of the characteristics of natural gas as fuel for vehicles and agricultural tractors / A.A.H Al-Maidi, D.A. Chernetsov, Y.V. [Rodionov](#), E.S. [Vdovina](#), D.V. [Nikitin](#), N.V. [Mikheev](#) // [Plant archives](#) №19, 2019. – P.1213-1218.
2. Аль-Майди, А.А.Х. Перспективы переоборудования сельскохозяйственных дизельных машин на газомоторное топливо/ А.А.Х. Аль-Майди, Д.А. Чернецов, Ю.В. Родионов, П.И. Селиванова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов, 2017. – № 4(66). – С. 194-200.
3. Ломовских, А.Е., Шаповалов А.А., Морозова О.Н., Ломовских Е.И. Способ модернизации системы питания ДВС с целью обеспечения экологической безопасности автомобильной техники. Материалы Всероссийской конференции и школы для молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности». Таганрог: ЮФУ, 2015. 196 с. С.175–177.
4. Al-Maidi, A. A.H. Mathematical modeling of thermo-regulation of fuel in

diesel engines YAMZ-238 / A. A.H. Al-Maidi, A.V. Shchegolkov, D.V. Nikitin, D.A. Chernetsov, N.V. Mikheev // Iraqi Journal of Agricultural Sciences – 2018:49(4), pp. 670-676.

5. Патент РФ № 2459091. Комбинированное устройство снижения токсичности отработавших газов дизеля/ Д.А. Чернецов, В.П. Капустин, А.В. Гончаров. Заявл. 25.10.2010. Опубл. 27.04.2012.

6. Чернецов Д.А. Обоснование способа очистки отработавших газов автотракторных дизелей / Д.А. Чернецов, В.П. Капустин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. Вернадского. – Тамбов. 2010. – № 7-9. – С. 38-43.

7. Чернецов Д.А. Способы нейтрализации отработавших газов в выпускной системе дизельных двигателей / Д.А. Чернецов, В.П. Капустин // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. Вернадского. – Тамбов. 2010. – № 10-12(31). – С. 71-74.

8. Al-Maidi, A. A.H. Study of a combined device to reduce the toxicity of exhaust gases of diesel engines, agricultural technology / A. A.H. Al-Maidi, D.A. Chernetsov, E.S. Vdovina // Iraqi Journal of Agricultural Sciences –2019:50(5), pp. 1259-1268.

9. Аль-Майди, А.А.Х. Обоснование необходимости исследования параметров работы двигателей, установленных на сельскохозяйственной технике, работающих на компримированном газе // 69-я научно-практическая конференция студентов и аспирантов, Мичуринск, 21-23 марта 2017 г. – С. 20-23.

10. О внесении изменений в пункт 13 технического регламента «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ»: Постановление Правительства Российской Федерации от 20.01.2012 г. №2.