

**Список литературы:** 1. *Маталин А.А.* Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология, металлорежущие станки и инструментъ». -Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. -496с. 2. *Андреев Г.Я.* Тепловая сборка колесных пар. – Харьков: Издательство Харьковского университета, 1965. – 227 с. 3. *Сизенов Л.К., Лохманов В.Н.* Вероятностный анализ точности обработки деталей в машиностроении. Учебное пособие. РИО МГТУ им. А.Н.Косыгина, 2010.-212 с. 4. Надёжность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырёв, В. В. Болотин и др.; Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985, - 608 с.

*Поступила в редколлегию 17.04.2012*

УДК 621.43

**А.М. ЛЕВТЕРОВ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
**Л.И. ЛЕВТЕРОВА**, вед. инженер, ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
**Н.Ю. ГЛАДКОВА**, вед. инженер, ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
**В.П. МАРАХОВСКИЙ**, мл. науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
**А.Н. АВРАМЕНКО**, канд. техн. наук, науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков

### **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БЕНЗОЭТАНОЛЬНЫХ СМЕСЯХ**

Наводятся результаты числового эксперимента та моторних випробувань автомобільного двигуна MeMZ 307-1. В якості моторного палива розглядаються бензоетанольні паливні композиції. Розрахункові дослідження ґрунтуються на квазівимірній термодинамічній моделі робочого процесу з двохзонною моделлю згоряння, випробування виконуються на моторному стенді.

Приводятся результаты численного эксперимента и моторных испытаний автомобильного двигателя MeMZ 307-1. В качестве моторного топлива рассматриваются бензоэтанольные топливные композиции. Расчетные исследования базируются на квазиметрической термодинамической модели рабочего процесса с двухзонной моделью сгорания, испытания проводятся на моторном стенде.

In article results of numerical experiment and motor tests of engine MeMZ 307-1 are resulted. As motor fuel are considered petrol-ethanol fuel compositions. Settlement researches are based on quasimetric thermodynamic model of working process with two-zoned model of combustion, tests are carried out on the motor stand.

**Введение и постановка задачи.** Использование в широких масштабах этанола и его смесей с бензином в качестве моторного топлива неоспоримо и уже не вызывает проблем, когда есть соответствующая инфраструктура и сопутствующее законодательство. В странах ЕС, Северной и Южной Америке этанольное альтернативное топливо давно заняло свою нишу. В Украине, где есть соответствующее законодательство и есть возможность применять

такое топливо с экологическим и экономическим эффектом для транспорта (особенно, когда речь идет о рациональном использовании отходов спиртового производства), но нет инфраструктуры и четких нормативных рекомендаций по адаптации двигателя, исследование моторных свойств топлива и его непосредственного применения в двигателях внутреннего сгорания различного типа своевременно и необходимо.

В ИПМаш НАН Украины в течение последних нескольких лет в рамках бюджетных и договорных обязательств, проводятся расчетно-экспериментальные исследования бензоэтанольных смесей применительно к конкретным двигателям [1, 2, 3].

В предлагаемой статье приводятся численные исследования, касающиеся прогнозирования основных характеристик двигателя, эмиссии вредных веществ в отработавших газах, и результаты моторных испытаний двигателя MeM3 307-1.

**Численное прогнозирование характеристик двигателя.** Расчетные мощностные, экономические показатели и показатели токсичности двигателя получены с помощью квазимерной термодинамической математической модели рабочего цикла поршневого двигателя. Эффективная вычислительная способность таких моделей, простота в использовании делают их популярными и полезными в исследовании рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания до настоящего времени, несмотря на существование детальных (но очень дорогих и трудоемких) вычислительных комплексов, созданных ведущими моторостроительными фирмами и лабораториями.

Математическая модель рабочего цикла двигателя объединяет все его процессы (наполнение, сжатие, сгорание, расширение) по ходу изменения текущего объема ( $V$ ) в цилиндре двигателя в соответствии с заданным шагом по углу поворота коленчатого вала

$$V = V_a / \varepsilon \cdot \left\{ \left[ 1 + (\varepsilon - 1) / 2 \cdot \left[ 1 + 1/\lambda - \cos \phi - (1 - \lambda^2 \cdot \sin \phi)^{0.5} \right] \right] \right\},$$

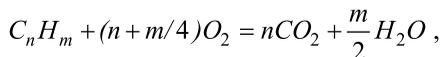
где  $V_a$  – максимальный объем цилиндра;  $\varepsilon$  – геометрическая степень сжатия;  $\phi$  – угол поворота коленчатого вала;  $\lambda$  – геометрический параметр кривошипно-шатунного механизма.

На участках сжатия и расширения математическая модель процесса основана на уравнении закона сохранения энергии в дифференциальной форме

$$dU = -pdV + dQ,$$

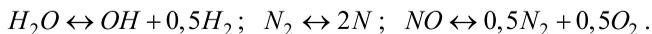
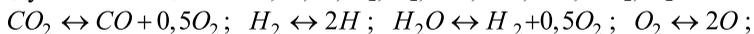
для участка расширения оно дополняется системой уравнений, определяющих равновесный состав продуктов сгорания.

При огромном разнообразии углеводородных топлив состав продуктов их полного сгорания одинаков:



а основные реакции горения углеводородов протекают быстро и можно счи-

тать, что сначала устанавливается равновесное состояние с повышением температуры, а затем протекают более медленные реакции. С учетом диссоциации продуктов сгорания семь общепринятых равновесных реакций горения можно записать с помощью 11 реагентообразующих и продуктообразующих индивидуальных веществ – N, O, H, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO, OH, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O:



Полученные равновесные концентрации продуктов сгорания, кроме того, позволяют упростить уравнения химической кинетики для расчета образования монооксидов азота по *механизму Зельдовича*, который используется при выполнении расчета исследуемого рабочего процесса.

Алгоритм принятого в модели *двухзонного механизма сгорания*  $u, s, v, g_1, g_2, x \rightarrow T_1, T_2, p$  [4] осуществляется численным решением соответствующей системы уравнений при известных теплофизических свойствах индивидуальных веществ и топлива:

$$(1-x) \cdot u(T_1, g_1) + x \cdot u(T_2, g_2) = u; \quad (1-x) \cdot R(g_1) \cdot T_1 + x \cdot R(g_2) \cdot T_2 = p \cdot v;$$

$$s_T(g_1, T_1) - R(g_1) \cdot \ln p = s; \quad v_2 = R(g_2) \cdot T_2 / p;$$

$$c_i = \psi(T_2, v_2), \quad g_{2i} = \mu_i \cdot v_2 \cdot c_i, \quad i = 1, \dots, N,$$

где индекс 1 относится к параметрам зоны заряда, 2 – к параметрам зоны продуктов сгорания;  $x$  – доля выгоревшей топливовоздушной смеси, задается тем или иным законом выгорания топливовоздушной смеси;  $u(T_k, g_k)$  – удельная внутренняя энергия соответствующей зоны;  $v_k$  – удельный объем соответствующей зоны;  $u$  – удельная внутренняя энергия системы;  $v$  – удельный объем системы;  $R(g_k)$  – газовая постоянная смеси;  $g_k$  – вектор равновесного состава смеси соответствующей зоны в массовых долях;  $p$  – давление;  $s$  – удельная энтропия зоны заряда,  $s_T$  – ее температурная составляющая;  $c$  – вектор концентраций компонент;  $\mu_i$  – молярная масса  $i$ -го компонента смеси;  $N$  – количество компонент в продуктах сгорания;  $\psi$  – процедура решения системы уравнений для определения вектора концентраций продуктов сгорания.

Величины  $u$  и  $s$  определяются интегрированием дифференциальных уравнений для *первого и второго законов термодинамики*:

$$dU = -pdV - dQ_1 - dQ_2; \quad dS = dQ_1 / T_1,$$

где  $dQ_1$  и  $dQ_2$  элементы теплоотдачи в стенки цилиндра от зон свежего заряда и продуктов сгорания.

Метод численного исследования [5] позволяет рассмотреть характеристики двигателя на всем спектре возможных бензоэтанольных топливных композиций – от «чистого бензина» до «чистого этанола» с любым процентным содержанием того и другого и в широком диапазоне изменения регули-

руемых параметров двигателя.

На рис. 1 – 4 приводятся некоторые результаты такого исследования. Показатели эмиссии монооксидов азота (NO) как функции коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и угла опережения зажигания ( $\varphi$ ) при фиксированной степени сжатия ( $\varepsilon$ ) для топлива, содержащего 30% этанола (Е 30), показаны на рис. 1, а рис. 2 иллюстрирует зависимость NO от доли этанола ( $G_z$ ) в топливной смеси ( $G_z$ ) и коэффициента избытка воздуха. Рис. 3 дает представление о возможности поиска компромисса между коэффициентом полезного действия ( $\eta$ ) и эмиссией NO путем оптимизации угла опережения зажигания и коэффициента избытка воздуха.

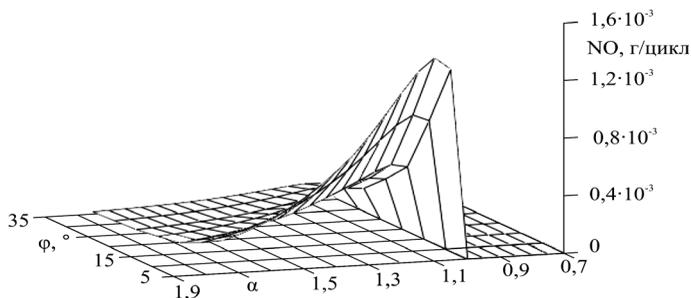


Рисунок 1 – Зависимость эмиссии монооксида азота от коэффициента избытка воздуха и угла опережения зажигания для топлива Е 30.

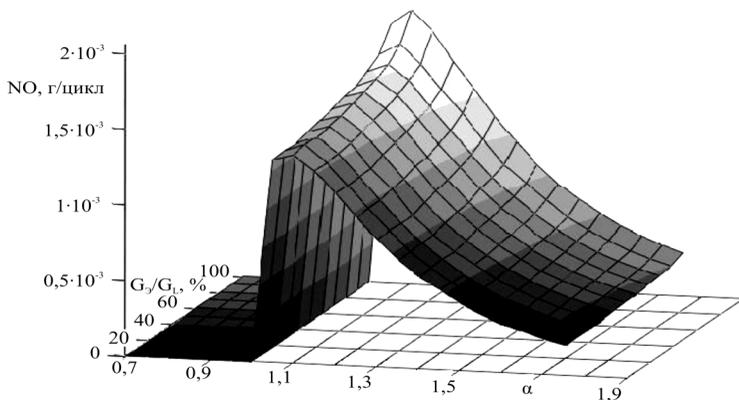


Рисунок 2 – Уровень эмиссии NO в зависимости от доли этанола в смесевом топливе и коэффициента избытка воздуха.

Как уже отмечалось, целью расчетных исследований являлось прогнозирование основных характеристик двигателя, работающего на бензоэтанольном топливе. Соотношение этанол/бензин влияет как на экономические и мощностные показатели двигателя, так и на показатели токсичности отра-

ботавших газов. На рис. 2 видно, как растет эмиссия NO с увеличением содержания этанола в смеси, а о том, как изменяются основные индикаторные показатели двигателя можно судить по рис. 4.

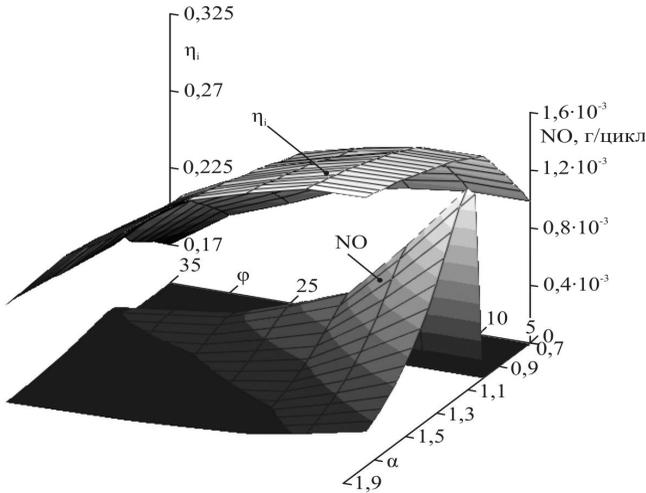


Рисунок 3 – Взаимовлияние коэффициента полезного действия, угла опережения зажигания, коэффициента избытка воздуха и эмиссии NO.

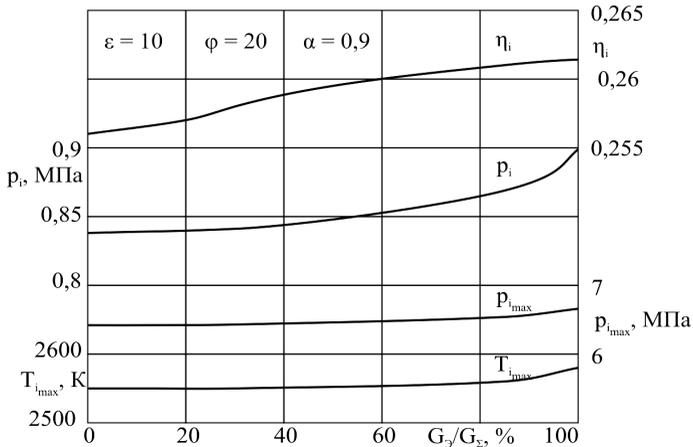


Рисунок 4 – Влияние доли этанола в топливе на энергоэкологические показатели двигателя.

**Результаты экспериментальных исследований и сопоставление с расчетом.** Экспериментальные исследования двигателя МеМЗ 307-1 проводились на двух топливных композициях: (Е-30) и (Е-85). Такой выбор топлива объясняется, во-первых, экономической целесообразностью эксперимента

и, во-вторых, имеющей возможность численного прогнозирования характеристик двигателя на других топливных композициях.

На рис. 5 приводятся некоторые сравнительные данные эффективных показателей, полученных в ходе расчёта и эксперимента внешних скоростных характеристик двигателя, работающего на бензине и на смесевом топливе E-30.

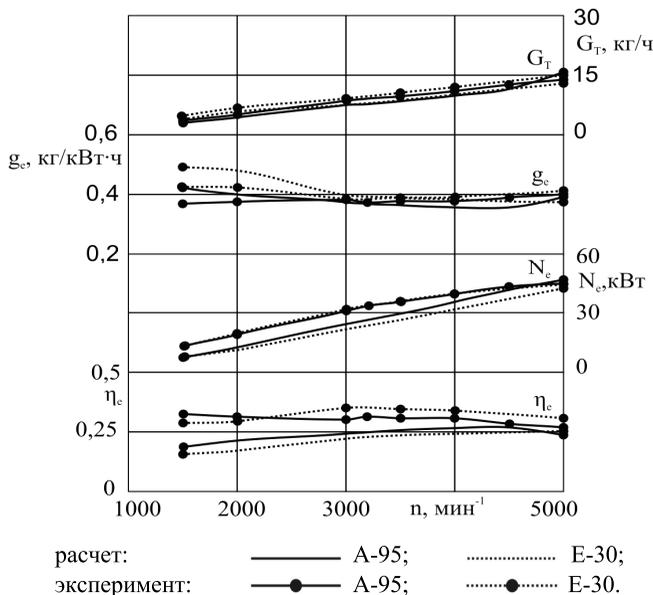


Рисунок 5 – Сравнение результатов эксперимента и расчета.

Стендовые испытания имели целью оценить влияние моторных качеств смесевого топлива на энергоэкологические и экономические показатели двигателя. Штатная система управления двигателем позволяет в интерактивном режиме изменять только один из регулируемых параметров. Испытания смесевого топлива E-30 показали, что достижение максимального приближения к показателям работы двигателя на бензине A-95 осуществляется регулированием угла опережения зажигания. На режиме максимального крутящегося момента ( $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ ) массовый расход смесевого топлива E-30 растет на 1,3 – 7 % в зависимости от величины угла опережения зажигания, и при этом удельный расход тепловых затрат уменьшается на 5 – 13,8 %, что свидетельствует о росте эффективного коэффициента полезного действия.

Работа двигателя на смесевом топливе E-85 в штатной комплектации на режиме номинальной мощности ( $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$ ) обеспечивает только 20 – 25% мощности при сравнении с работой на бензине A-95. Для получения приемлемых показателей работы двигателя требуется двухфакторная оптимизация: по углу опережения зажигания и по продолжительности впрыскивания топлива, то есть по  $\alpha$ , и это является предметом дальнейших исследо-

ваний, поскольку результаты испытаний при воздействии только на один из регулируемых параметров не дают удовлетворительных эксплуатационных характеристик.

На рис. 6 представлены показатели токсичности двигателя, работающего на бензоэтанольных смесях (Е-30, Е-85) и бензине А-95 на режиме номинальной мощности ( $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$ ) в зависимости от управления или углом опережения зажигания, или продолжительностью впрыска топлива.

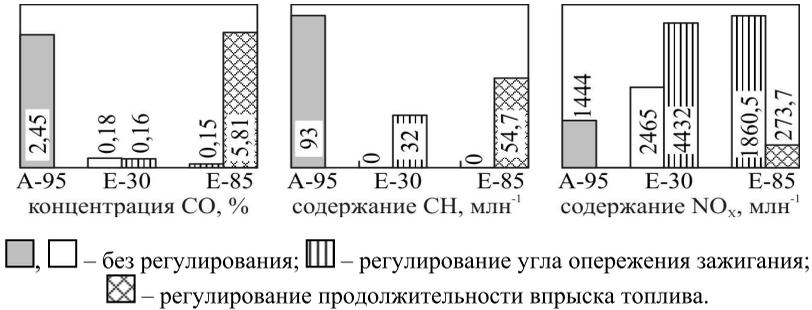


Рисунок 6 – Содержание токсичных веществ в отработавших газах двигателя в зависимости от управления регулируемыми параметрами.

**Выводы.** Анализ результатов численного и экспериментального исследований двигателя МеМЗ-307-1 позволяет сделать вывод, что при соответствующем управлении регулируемыми параметрами можно добиться приемлемых эксплуатационных характеристик при работе на бензоэтанольных смесях с различным соотношением этанол/бензин. Но, если расчетные исследования эти возможности просто констатируют, то экспериментальные исследования показывают необходимость изменений в программе управления двигателем.

**Список литературы:** 1. Левтеров А.М., Мараховский В.П., Левтерова Л.И., Гладкова Н.Ю. Результаты расчетно-экспериментальных исследований характеристик автомобильного двигателя при использовании бензоэтанольных смесей // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – 2008. – № 23. – С. 100-103. 2. Левтеров А.М., Левтерова Л.И., Гладкова Н.Ю. Исследование характеристик двигателя с искровым зажиганием, работающего на бензоэтанольных топливных композициях // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – № 1. – С. 52-57. 3. Левтеров А.М., Мараховский В.П., Бганцев В.Н., В.Н. Саранина В.Н. Экспериментальная оценка энерго-экологических показателей автомобильного двигателя на бензоэтаноле // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – 2008. – Вып. 22. – С. 98–101. 4. Куценко А. С. Моделирование рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания на ЭВМ. – К.: Наукова думка, 1988. – 104 с. 5. Левтеров А.М., Левтерова Л.И., Гладкова Н.Ю. Метод исследования характеристик поршневых ДВС на альтернативных топливах // Вісник НТУ «ХПІ»: «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – 2011. – Вып. 42. - С. 99-106.(8стр.)

Надійшла до редколегії 23.04.2012