

циклом связана с изменением закона отвода теплоты, т.е. с заменой продолженного расширения по адиабате с замыканием цикла по изохоре на замыкание по изотерме.

2. Неиспользование теплоты в идеализированном цикле является предельным, уменьшить которое в тепловом двигателе не представляется возможным, что определяет теоретически максимальное значение термического КПД теплового двигателя.

3. Предлагаемый метод анализа индикаторного КПД позволяет дифференцировать влияние на  $\eta_i$  различных процессов с учетом особенностей их развития и может быть успешно использован в комплексе теоретических и экспериментальных методов исследования и реализации мероприятий по повышению топливной экономичности двигателя.

**Список литературы:**

1. Матиевский Д.Д., Дудкин В.И., Батулин С.А. Участие сажи в рабочем цикле дизеля и инди-

каторный КПД// Двигателестроение. - 1983. - №3. - С.54-56. 2. Матиевский Д.Д. Метод анализа индикаторного КПД рабочего цикла двигателя // Двигателестроение. - 1984. - №6. - С. 7 - 11. 3. Ефремов И.Ф., Матиевский Д.Д. Метод анализа топливной экономичности поршневых ДВС // Двигателестроение. - 1986. - №10. - С. 3 - 6. 4. Матиевский Д.Д., Синицын В.А. Расчетно-экспериментальные методы исследования граничных условий теплообмена и его влияние на индикаторный КПД ДВС// Вестник АлтГТУ. - Барнаул. – 2000. - №2. - С.20-25. 5. Матиевский Д.Д., Свистула А.Е. Повышение экономичности и снижение вредных выбросов дизеля воздействием на рабочий процесс присадки газа к топливу// Вестник АлтГТУ. - Барнаул. – 2000. - №2. - С.122-128. 6. Марченко А.П. Термодинамическая оценка резервов повышения КПД двигателей внутреннего сгорания// Двигатели внутреннего сгорания научно-техн. журнал. - Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. - №2(5). – С.3-5.

УДК 621.434.13

**Н.И. Мищенко, д-р техн. наук, А.В. Химченко, канд. техн. наук,  
С.Н. Крамарь, канд. техн. наук**

**ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ СЖАТИЯ И РАЗДЕЛЕННОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ НА СОДЕРЖАНИЕ СО И NO<sub>x</sub> В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ ДВУХТАКТНОГО БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**Введение**

Одной из важнейших проблем современного двигателестроения является снижение токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) при одновременном улучшении их экономических и мощностных показателей. Применение в двухтактных бензиновых двигателях регулирования степени сжатия на частичных режимах и

расслоения заряда в камере сгорания позволяет комплексно решить эту проблему.

**1. Постановка проблемы**

Двухтактный ДВС с кривошипно-камерной продувкой – один из наиболее широко распространенных типов двигателей для минитехники и малогабаритных транспортных средств. В разработке автомобильных двухтактных двигателей уже достигну-

ты определенные успехи. В последние годы двухтактный ДВС считают вполне перспективным двигателем для легковых и малогабаритных грузовых автомобилей, так как он характеризуется высокой удельной мощностью, имеет хорошую равномерность характеристики крутящего момента, обладает хорошими массогабаритными показателями.

Ряд компаний, совершенствуя рабочий процесс и делая ставку на преимущества двухтактного ДВС, готовятся к производству или уже начали выпускать автомобили с двухтактными двигателями [1-7]. В Японии на протяжении последних лет ведущие фирмы расходуют миллионы долларов на создание и развитие двухтактных бензиновых двигателей автомобильного типа [8, 9]. Однако следует констатировать, что на сегодня двухтактный ДВС не может конкурировать с четырехтактным двигателем из-за нерешенности вопросов снижения токсичности ОГ и повышения топливной экономичности.

Для устранения этих недостатков предлагаются новые идеи организации рабочего процесса, проводятся опытно-конструкторские и исследовательские работы по созданию двигателей нетрадиционной конструкции. В этом направлении при участии авторов статьи ведутся обширные работы в автомобильно-дорожном институте ДонНТУ, где разработаны два экспериментальных двухтактных бензиновых двигателя – с отдельной подачей свежего заряда [10] и бесшатунного с изменяемой степенью сжатия [11, 12].

## 2. Решение проблемы. Результаты экспериментов

В настоящей статье представлены результаты исследования опытных двигателей, в ходе которого изучались, в частности, выбросы монооксида углерода (СО) и оксидов азота (NOx). Результаты исследования эмиссии углеводородов (СН) в этих двигателях изложены в [13].

Экспериментальные двигатели созданы на базе двухтактного двигателя мотопилы «Тайга-214» (диаметр цилиндра 50 мм, ход поршня 38 мм, частота вращения вала при максимальной мощности  $7000 \text{ мин}^{-1}$ , степень сжатия 7). В бесшатунном двигателе с изменяемой степенью сжатия ( $\epsilon$ ) кривошипно-шатунный механизм заменен на кривошипно-кулисный и, кроме того, имеется устройство, позволяющее регулировать  $\epsilon$  в пределах от 5 до 16 [12].

Второй экспериментальный двигатель имеет кривошипно-шатунный механизм и снабжен поршневым нагнетателем для отдельной подачи свежего заряда [10]. Нагнетателем служит переоборудованный для этих целей двухтактный двигатель мотопилы Shindaiwa 500 (Япония), в котором выпускное окно заглушено, а свечное отверстие подключено через золотник к камере сгорания двигателя.

Токсичность ОГ двигателя определялась с помощью газоанализатора Bosch ЕТТ 008.71 по методике, изложенной в [13].

### 2.1. Двигатель с отдельной подачей свежего заряда

#### Монооксид углерода

Как известно, в бензиновых ДВС образование СО может происходить при сгорании богатых топливовоздушных смесей. Кроме того, СО может выделяться и при наличии избытка кислорода вследствие диссоциации диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), возникающего при высоких температурах (выше 2000 К) [14]. В двухтактных бензиновых двигателях температуры относительно невелики, что связано с невысокими степенями сжатия и наличием большого количества остаточных газов. Поэтому основной причиной образования СО в этих двигателях является недостаток кислорода в рабочей смеси.

На рис. 1 показаны эмиссии СО в зависимости от состава смеси серийного и экспериментального двигателей.

Форма кривой CO серийного двигателя соответствует общепринятой для бензиновых двигателей как двухтактных, так и четырехтактных. При сгорании бедных смесей содержание CO в отработавших газах минимально, а при обогащении смеси эмиссия CO резко возрастает. Это объясняется недостатком кислорода в рабочей смеси. В двигателе с раздельной топливоподачей кривая CO имеет такую же форму, как и у серийного двигателя, но эквидистантно смещена в сторону бедных смесей. Минимум выбросов

CO (0,5 – 0,2 %), находится в диапазоне среднего по цилиндру коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,45 - 1,55$ . Этот факт объясняется тем, что на момент воспламенения в цилиндре двигателя формируется расслоенный заряд. В начальный период горения сгорает богатая смесь, и в ней из-за недостатка кислорода образуется CO. При дальнейшем выгорании бедных смесей температура сгорания резко падает, исключая тем самым выделение CO вследствие диссоциации CO<sub>2</sub>.

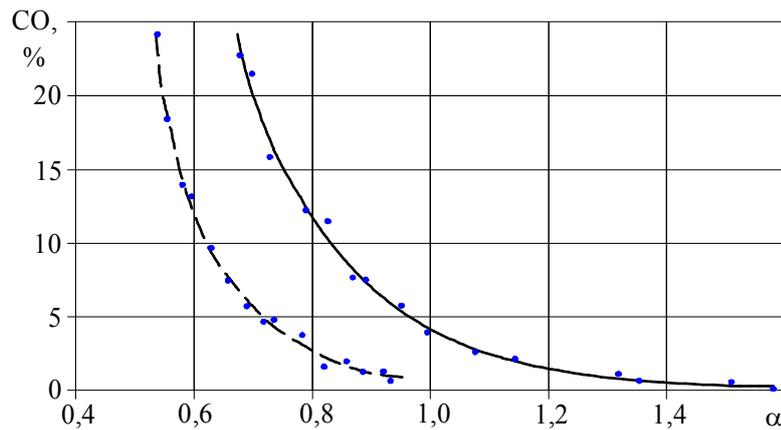


Рис. 1. Зависимость выбросов CO от состава смеси ( $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ ): сплошная линия – двигатель с раздельной топливоподачей; пунктирная – классический ДВС

Оксиды азота

На рис. 2 показаны зависимости содержания в отработавших газах оксидов азота от состава смеси. Форма кривой NO<sub>x</sub> двигателя с раздельной топливоподачей аналогична кривой серийного двигателя, но

смещена в зону бедных смесей. Как и в случае с эмиссией CO, это связано с процессом сгорания расслоенного заряда. Аналогичный эффект был получен Н.П. Самойловым при расслоении смеси подачей воздуха в нижнюю часть цилиндра [15].

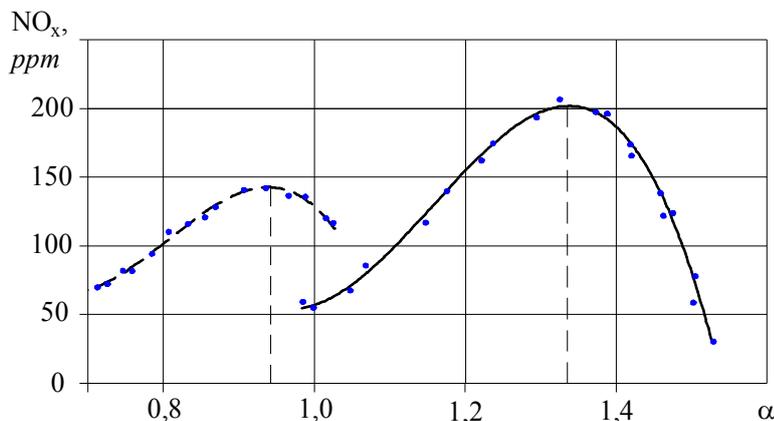


Рис. 2. Зависимость выбросов NO<sub>x</sub> от состава смеси ( $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ ): сплошная линия – двигатель с раздельной топливоподачей; пунктирная – классический ДВС

Увеличение максимальных выбросов оксидов азота (на 50 *ppm*) объясняется более высокими температурами сгорания, которые связаны с уменьшением доли остаточных газов (продувка производилась воздухом без дросселирования на впуске) и дозарядкой цилиндра.

В двигателе с отдельной топливopодачей, дополнительное влияние на увеличение выбросов NO<sub>x</sub> оказывают местные повышенные температуры газов в камере сгорания [14]. Это связано с тем, что в камере при расслоении заряда всегда имеется смесь с местными значениями коэффициента избытка воздуха  $\alpha \geq 1,0$ .

**2.2. Двигатель с изменяемой степенью сжатия**

**Монооксид углерода**

Поскольку состав смеси является определяющим фактором, влияющим на выбросы CO, увеличение  $\alpha$  с уменьшением нагрузки приводит к снижению выбросов CO при всех  $\epsilon$  (рис. 3).

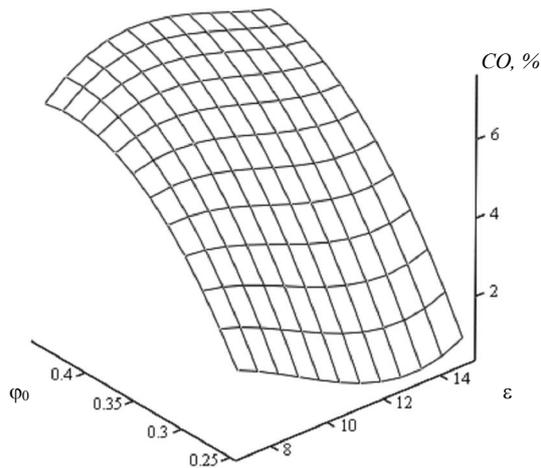


Рис. 3. Зависимость выбросов CO от  $\phi_0$  и степени сжатия при  $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

Увеличение степени сжатия приводит к некоторому снижению CO. На малых нагрузках (при коэффициенте наполнения кривошипной камеры  $\phi_0 = 0,35$

– 0,45), где значения  $\alpha$  достигали 1, концентрации CO снижались до 1 %.

**Оксиды азота**

В двухтактном двигателе с кривошипно-камерной продувкой имеется большее количество остаточных газов в камере сгорания. Связанные с этим особенности рабочего процесса двухтактного двигателя приводят к однозначному снижению выбросов NO<sub>x</sub>, по сравнению с четырехтактным ДВС, на всех режимах работы.

При испытаниях экспериментального образца двигателя максимальная концентрация NO<sub>x</sub> не превышала 100 *ppm* (рис. 4).

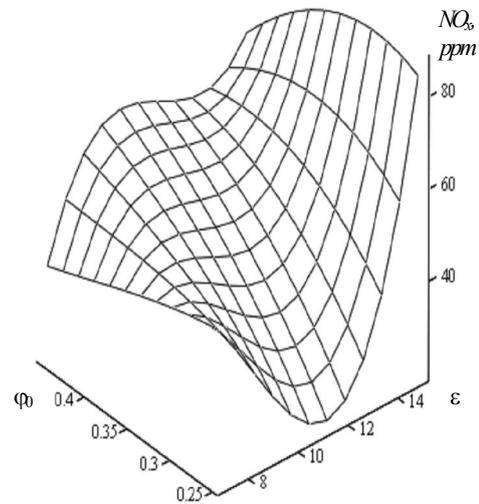


Рис. 4. Зависимость выбросов NO<sub>x</sub> от  $\phi_0$  и  $\epsilon$  при  $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

Изменение  $\epsilon$  на частичных нагрузках неоднозначно сказывается на выбросах NO<sub>x</sub>. Так как факторы, влияющие на образование NO<sub>x</sub>, в основном зависят от  $\alpha$ , состав смеси имеет определяющее значение. Следует отметить, что в двухтактных двигателях из-за большого количества остаточных газов значения мощностного и экономичного составов смеси сдвигаются в сторону ее обогащения. Повышение же степени сжатия позволяет двигателю эффективно работать на более бедных смесях. Влияние  $\epsilon$  на процессы впуска привело к изменению  $\alpha$  в кри-

вошипной камере. При этом, увеличение количества кислорода в смеси создает условия для соответствующего роста эмиссии  $\text{NO}_x$  в отработавших газах.

Как видно из рис. 4, при средних нагрузках ( $\varphi_0 = 0,35 - 0,45$ ) рост концентрации  $\text{NO}_x$  в отработавших газах пропорционален обеднению смеси.

При малых наполнениях кривошипной камеры и  $\varepsilon = 9 - 13$  выбросы  $\text{NO}_x$  имеют минимальное значение. Это можно объяснить тем, что при обеднении смеси в области  $\alpha > 1$  и наличии значительного количества остаточных газов скорость сгорания уменьшается, что снижает максимальную температуру цикла.

В целом увеличение  $\varepsilon$  на частичных нагрузках приводит к увеличению выбросов  $\text{NO}_x$  в 2 – 3 раза, но при этом концентрация оксидов азота остается гораздо ниже, чем у четырехтактных двигателей.

#### Заключение

Экспериментальные результаты для различных типов ДВС свидетельствуют о том, что основным параметром для выбросов CO является состав смеси. Степень сжатия и расслоение заряда оказывают незначительное влияние.

Экспериментально установленные предельные уровни  $\text{NO}_x$  в отработавших газах двигателей с расслоением заряда и изменяемой степенью сжатия значительно выше от соответствующих уровней  $\text{NO}_x$  в отработавших газах обычных двухтактных бензиновых ДВС. Однако в этих двигателях концентрация  $\text{NO}_x$  остается гораздо ниже, чем у четырехтактных бензиновых ДВС.

#### Список литературы:

1. Woodward Brian. Australian two-stroke without the blue smoke // "Newsi". — 1988. — 119, 1624. — P. 36. 2. Rehsche Michael. Zurück in die Zukunft // INUFA Transp. Rdsch. — 1993. — 14, № 1. — P. 19 – 20. 3. Der Zweitakt-Automobilmotor // KFZ. — 1992. — 35, №10. — P. 451 – 456. 4. Ealey Lance. Two-stroke revo-

lution brews in the land down under // "Auto-mot. Ind." — 1986, 166. — № 7. — P. 28 – 29. 5. Langerman Melissa. First sales of orbital engine // Search. — 1996. — 27, № 7. — С. 203. 6. Yamazaki Takayuki. Бензиновые двигатели на Токийском автосалоне // Найнэн кикан = Intern. Combust. Engine. — 1990. — 29, № 2. — P. 83 – 88. 7. Daniels J. Renaissance des Zweitakt-ers? // Fahrzeug + Kaross. — 1989. — 42, № 11. — S. 42 – 43. 8. Ishihara Soichi. Возрождение интереса к двухтактным автомобильным ДВС // "Дзидоса гидзюцу, J.Soc. Autom. Eng. Jap." — 1987. — 41, № 9. — P. 1011 – 1017. 9. Renaissance des Zweitakt-ers? // Autotechnik. — 1993. — 42, № 3. — P. 10 – 21. 10. Н. И. Мищенко, С. Н. Крамарь. Пути повышения экономичности двухтактных бензиновых двигателей внутреннего сгорания // Автомобильный транспорт / Сборник научных трудов ХНАДУ (ХАДИ). – Вып. 7 – 8. – Харьков. – 1999. – С. 174 – 176. 11. Мищенко Н. И., Химченко А. В. Выбор и расчет параметров бесшатунного бензинового двигателя с переменной степенью сжатия // Сб. трудов междунар. науч.-техн. конф. "Прогрессивные технологии машиностроения и современность". — Донецк: ДонГТУ. — 1997. — С. 166 – 168. 12. Мищенко Н. И., Химченко А. В., Новокрещенов В. С. Бесшатунный двухтактный двигатель с механизмом изменения степени сжатия // Отраслевое машиностроение: Труды / Таврическая государственная агротехническая академия. — Мелитополь: ТГАТА. — 1998. — Т. 6, вып. 2. — С. 36 – 37. 13. Мищенко Н. И., Химченко А. В., Крамарь С. Н., Колесникова Т. Н. Влияние степени сжатия и смешанной топливоподачи на эмиссию СН в двухтактных бензиновых двигателях. – Труды ПГАСА. – Днепрпетровск: 2002. – С. 54 – 57. 14. Воинов А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1977. — 277 с. 15. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 1973. — 200 с.