

УДК 621.43.003.13.:504

*С.А. Ерощенко, д-р техн. наук, В.А. Корогодский, канд. техн. наук,
О.В. Василенко асп.*

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДН-4М С КАРБЮРАТОРОМ И НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКОМ ТОПЛИВА

Введение и постановка проблемы

В связи с ограниченностью запасов органического топлива и стабильным ростом его потребления, особенно жидкого и газообразного, проблема его рационального и эффективного использования выходит в разряд наиболее острых и требующих неотлагательного решения. При этом основным потребителем светлых жидких топлив являются в настоящее время двигатели внутреннего сгорания (ДВС), которые производят более 80% механической энергии, потребляемой человечеством в своей деятельности [1]. Из них весьма представительным классом по количеству выпускаемых в мире единиц оказались ДВС с искровым зажиганием (ИЗ), как двухтактные, так и четырехтактные.

Двухтактные двигатели с ИЗ при внешнем смесеобразовании имеют повышенный расход топлива и значительный выброс вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ). Низкий уровень экономических и экологических характеристик таких двигателей обусловлен потерей части топлива при продувке (10–30%) и низким индикаторным КПД (η_i). Исключить потери топлива при продувке в двухтактном ДВС с ИЗ и повысить η_i возможно путем организации внутреннего смесеобразования с применением непосредственного впрыскивания топлива (НВТ). При этом значительно снижаются и выбросы ВВ в ОГ.

Анализ публикаций

Повышенные экономические и экологические требования к современным ДВС с ИЗ способствова-

ли созданию рабочих процессов и конструкций двухтактных ДВС с ИЗ, оборудованных системами НВТ. За рубежом фирмами Yamaha, Aprilia, Orbital Co. и т.д. [2, 9] широко внедряются в производство двухтактные ДВС с ИЗ и НВТ. При этом разработки австралийской фирмы Orbital Co. защищены более 800 патентами [3]. Следует отметить разработки двухтактных ДВС с ИЗ и НВТ фирмы Evinrude, один из двигателей этой фирмы признан лучшим двигателем 2006 года [4]. На протяжении последних лет в странах СНГ также ведутся исследования двухтактных двигателей с ИЗ и НВТ. В работе [5] предлагается использовать на легковых автомобилях двухтактные двигатели с прямоточной продувкой. В работах [6, 7] отмечается, что применение НВТ на двухтактных двигателях с ИЗ позволяет получить значительное снижение расхода топлива и токсичности ОГ. Наиболее высокие показатели были получены в работе [8], где предложено использовать НВТ с глубоким расслоением топливо-воздушного заряда (ТВЗ) на частичных нагрузках. Организация рабочего процесса с расслоением ТВЗ в двухтактном двигателе с ИЗ позволила в среднем в 1,5 раза снизить расход топлива и значительно уменьшить выбросы ВВ с ОГ.

Цель и задачи исследований

Целью настоящих исследований являлось оценка экономических и экологических показателей двигателя ДН-4М с ИЗ с внешним смесеобразованием (карбюратор) и внутренним смесеобразованием (НВТ).

Обработка и анализ экспериментальных данных

Экспериментальные исследования проводились по нагрузочным характеристикам при частоте вращения коленчатого вала $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ на двухтактном одноцилиндровом двигателе для средств малой механизации ДН-4М ($S/D=87/82$; $\varepsilon=8,5$) с ИЗ воздушным охлаждением и кривошипно-камерной продувкой. Во время эксперимента применялись две системы питания двигателя. С карбюраторной системой питания обеспечивалась гомогенная топливовоздушная смесь (ТВС) при $\alpha=0,8-0,9$, а система НВТ позволила организовать пленочное смесеобра-

зование и расслоение ТВЗ при значении $\alpha_{\Sigma}=1,4-2,0$ на частичных режимах работы двигателя и гомогенный стехиометрический состав ТВС в цилиндре при полной нагрузке $\alpha_{\Sigma} \approx 1,0$. Непосредственный впрыск топлива и расслоение ТВЗ позволили повысить степень сжатия $\varepsilon=12$ и при работе на низкооктановом топливе.

Для двигателя с НВТ минимальный удельный эффективный расход топлива составил $g_{e \text{ мин}}=264 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ ($\eta_{e \text{ max}}=0,31$) в диапазоне изменения нагрузок от $P_e=0,25 \text{ МПа}$ до $P_e=0,32 \text{ МПа}$, а при карбюраторной системе питания – $g_{e \text{ мин}}=483 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ ($\eta_{e \text{ max}}=0,17$) при $P_e=0,3-0,4 \text{ МПа}$ (рис.1) [8].

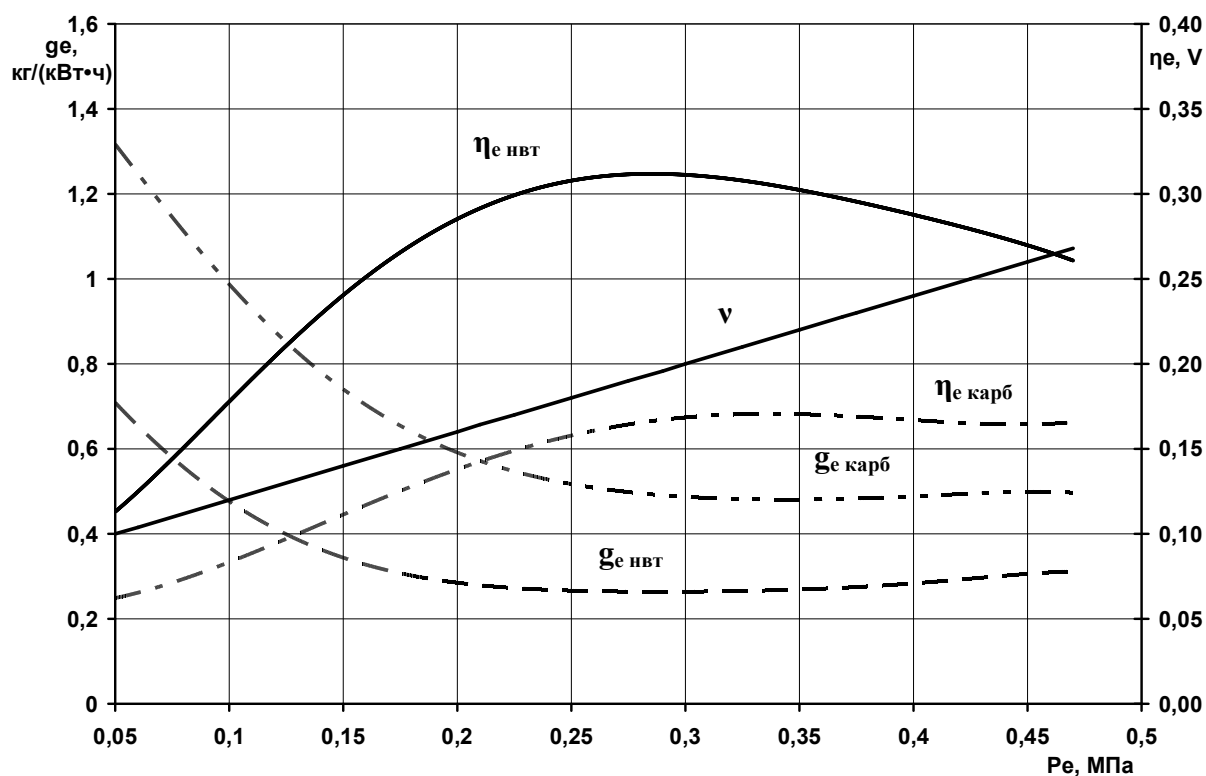


Рис. 1. Нагрузочные характеристики двигателя ДН-4М при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

— $\eta_{e \text{ НВТ}}$ - · - $\eta_{e \text{ карб}}$ - · · $g_{e \text{ карб}}$ - - - $g_{e \text{ НВТ}}$ — v

Существенное снижение расхода топлива (в 1,83 раза) и повышение эффективного КПД во всем диапазоне изменения нагрузок достигнуто за счет исключения потерь топлива при продувке и повышения индикаторного КПД за счет повышения сте-

пени сжатия до $\varepsilon=12$ и организации эффективного процесса сгорания расслоенного ТВЗ.

Потери топлива при продувке цилиндра с карбюраторной системой питания могут быть определены через коэффициент утечки продувочного воздуха

(v). Он равен отношению количества транзитного воздуха ($G_{в. mp}$) при продувке к количеству воздуха ($G_{в}$), поступившего в цилиндр за цикл или за час работы двухтактного двигателя и определялся по формуле:

$$v = \frac{G_{в. mp}}{G_{в}} = \frac{G_{в. mp}}{G_{в.ц} + G_{в. mp}} = \frac{G_{в. mp}}{G_{в.ц} \cdot \left(1 + \frac{G_{в. mp}}{G_{в.ц}}\right)}, \quad (1)$$

где $G_{в}$ – количество поступающего на впуске в цилиндр воздуха, кг/ч;

$G_{в. mp}$ – количество транзитного, вытекающего в выпускную систему воздуха при продувке цилиндра, кг/ч;

$G_{в. ц}$ – количество воздуха, оставшегося в цилиндре, кг/ч.

Поскольку продувка производится ТВС, то предполагая, что при газообмене концентрации поступающей в цилиндр и вытекающей из него ТВС одинаковы, можно утверждать, что количество потерянного транзитного воздуха ($G_{в. mp}$) при продувке будет пропорционально количеству потерянного транзитного топлива ($G_{т. mp}$) и количеству потерянной транзитной ТВС, тогда:

$$Z = \frac{G_{в. mp}}{G_{в.ц}} = \frac{G_{т. mp}}{G_{т.ц}} = \frac{G_{см. mp}}{G_{см.ц}} \quad (2)$$

и

$$v = \frac{G_{в. mp}}{G_{в}} = \frac{G_{т. mp}}{G_{т}} = \frac{G_{см. mp}}{G_{см}} = \frac{Z}{1 + Z}, \quad (3)$$

где $G_{т}$ – количество поступающего на впуске в цилиндр топлива, кг/ч;

$G_{т. mp}$ – количество транзитного топлива, потерянного при продувке цилиндра, кг/ч;

$G_{т. ц}$ – количество топлива, оставшегося в цилиндре, кг/ч;

$G_{см}$ – количество поступающей на впуске в цилиндр ТВС, кг/ч;

$G_{см. mp}$ – количество транзитной ТВС, потерянной при продувке цилиндра, кг/ч;

Z – коэффициент, учитывающий потерю воздуха, топлива или ТВС при продувке цилиндра, который равен отношению количества транзитного воздуха ($G_{в. mp}$), топлива ($G_{т. mp}$) или ТВС ($G_{см. mp}$) при продувке к количеству воздуха ($G_{в. ц}$), топлива ($G_{т. ц}$) или ТВС ($G_{см. ц}$), оставшихся в цилиндре после завершения процессов газообмена.

В результате экспериментальных исследований установлено, что с повышением нагрузки от $P_e=0,05$ МПа до $P_e=0,47$ МПа коэффициент утечки продувочного воздуха (v) возрастает от 0,1 до 0,27 (рис. 1), что соответствует потере топлива в зависимости от нагрузки на 10-27%. Если теоретически исключить потери топлива при продувке, то можно считать, что с карбюраторной системой питания g_e снижается на 10-27% при работе по нагрузочной характеристике двигателя при $n=3000$ мин⁻¹ (рис. 1).

Таким образом, установлено, что при переходе в двухтактном двигателе с ИЗ с внешнего смесеобразования к внутреннему за счет исключения потерь топлива при продувке экономичность двигателя повышается на 10–27%, а остальное повышение экономичности достигнуто за счет улучшения η_i путем повышения степени сжатия (ϵ) с 8,5 до 12 и эффективной организации процессов смесеобразования и сгорания расслоенного ТВЗ.

Для сравнительной оценки эффективности протекания внутрицилиндровых процессов при НВТ и карбюраторной системе питания был выполнен анализ индикаторных показателей двухтактного двигателя ДН-4М. Определение индикаторных показателей двигателя проводилось по развернутым осредненным индикаторным диаграммам на режимах нагрузочной характеристики при $n=3000$ мин⁻¹. Осредненная индикаторная диаграмма на каждом режиме

определялась путем обработки одноцикловых диаграмм, где устанавливалось p_z^{cp} исходя из p_z^{max} и p_z^{min} ($p_z^{cp} = \frac{p_z^{max} + p_z^{min}}{2}$). Затем, по расчетному зна-

чению p_z^{cp} из 100 диаграмм выбиралась наиболее близкая, которая затем подвергалась обработке. На рис. 2 и 3 приведены примеры таких диаграмм.

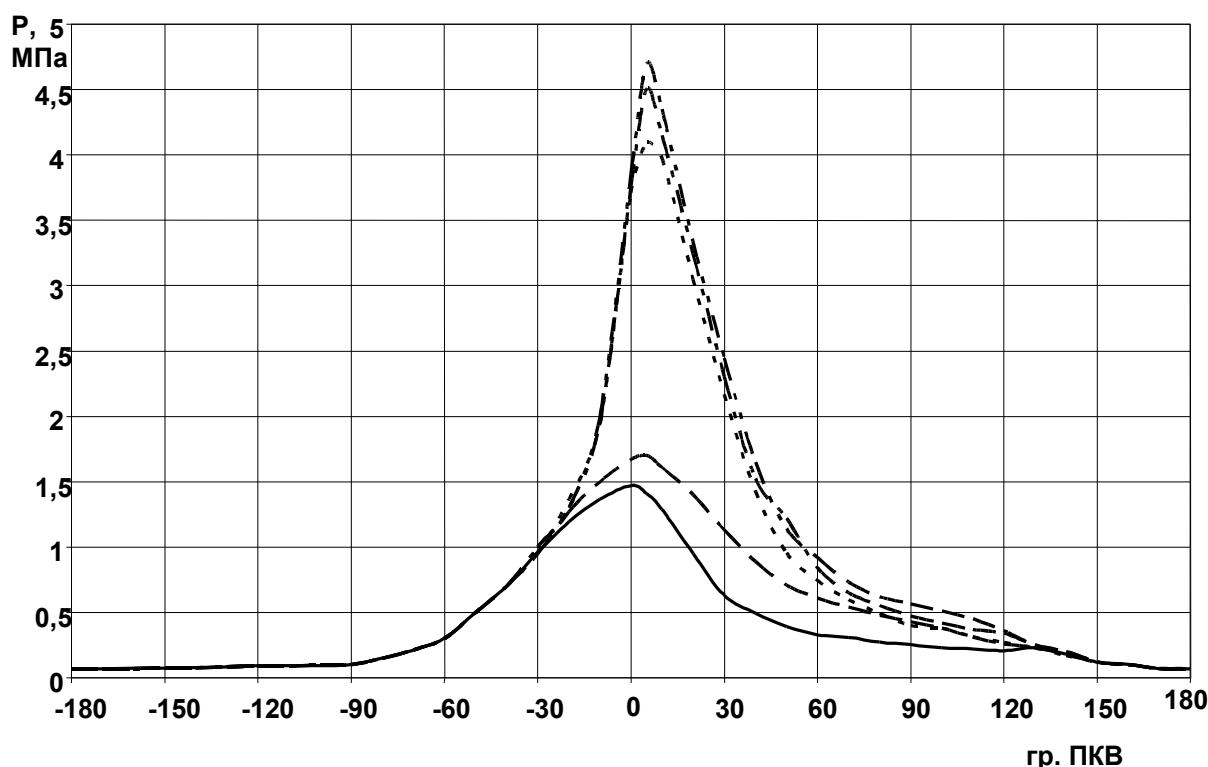


Рис. 2. Осредненные индикаторные диаграммы двигателя с карбюратором

— сжатие - расширение
 - - - - - $P_e=0,05$ МПа
 - · - · - $P_e=0,37$ МПа
 - · · - $P_e=0,4$ МПа
 - - - - $P_e=0,45$ МПа

Для определения η_i двигателя с карбюратором использовалась методика, изложенная в [10]. Согласно этой методике при определении η_i учитывается только то топливо, которое осталось в цилиндре ($G_{T.ц}$). Тогда общее количество топлива (G_T), поступающего в двигатель за цикл можно определить как:

$$G_T = G_{T.ц} + G_{T.mp} = G_{T.ц} \left(1 + \frac{G_{T.mp}}{G_{T.ц}} \right) \quad (4)$$

или согласно формулы (2)

$$G_T = G_{T.ц} (1 + Z). \quad (5)$$

Определение индикаторного КПД для двухтактного двигателя с внешним смесеобразованием производилось по формуле:

$$\eta_i = \frac{L_i}{Q_n^p \cdot G_T} = \frac{L_i}{Q_n^p \cdot (G_{T.ц} + G_{T.mp})} = \frac{L_i}{Q_n^p \cdot G_{T.ц} \cdot (1 + Z)} = \eta_i' \cdot \frac{1}{1 + Z}, \quad (6)$$

где $\eta_i' = \frac{L_i}{Q_n^p \cdot G_{T.ц}} = \eta_i (1 + Z)$,

η_i' – индикаторный КПД, определяемый по новой методике;

η_i – индикаторный КПД, определяемый по общепризнанной методике;

L_i – внутрицилиндровая индикаторная работа газов за цикл, кДж;

Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$G_{T.ц}$ – количество топлива, оставшегося в цилиндре за цикл, кг/цикл;

$G_{T.мп}$ – количество транзитного топлива, потерянного при продувке цилиндра, кг/цикл;

Тогда формула для определения эффективного КПД (η_e) примет вид:

$$\begin{aligned} \eta_e &= \frac{L_e}{Q_n^p \cdot G_T} = \frac{\eta_m \cdot L_i}{Q_n^p \cdot G_T} = \eta_m \frac{L_i}{Q_n^p (G_{T.ц} + G_{T.мп})} = \\ &= \eta_m \cdot \frac{L_i}{Q_n^p \cdot G_{T.ц} + Q_n^p \cdot G_{T.мп}} = \\ &= \eta_m \cdot \frac{L_i}{Q_n^p \cdot G_{T.ц} \cdot \left(1 + \frac{G_{T.мп}}{G_{T.ц}}\right)} = \eta_m \cdot \eta_i \cdot \frac{1}{(1 + Z)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где L_e – эффективная работа за цикл на выходном валу двигателя, кДж;

$\eta_m = N_e/N_i = P_e/P_i$ – механический КПД двигателя;

$\eta_i = 3600/(Q_n^p \cdot g_i)$ – индикаторный КПД двигателя.

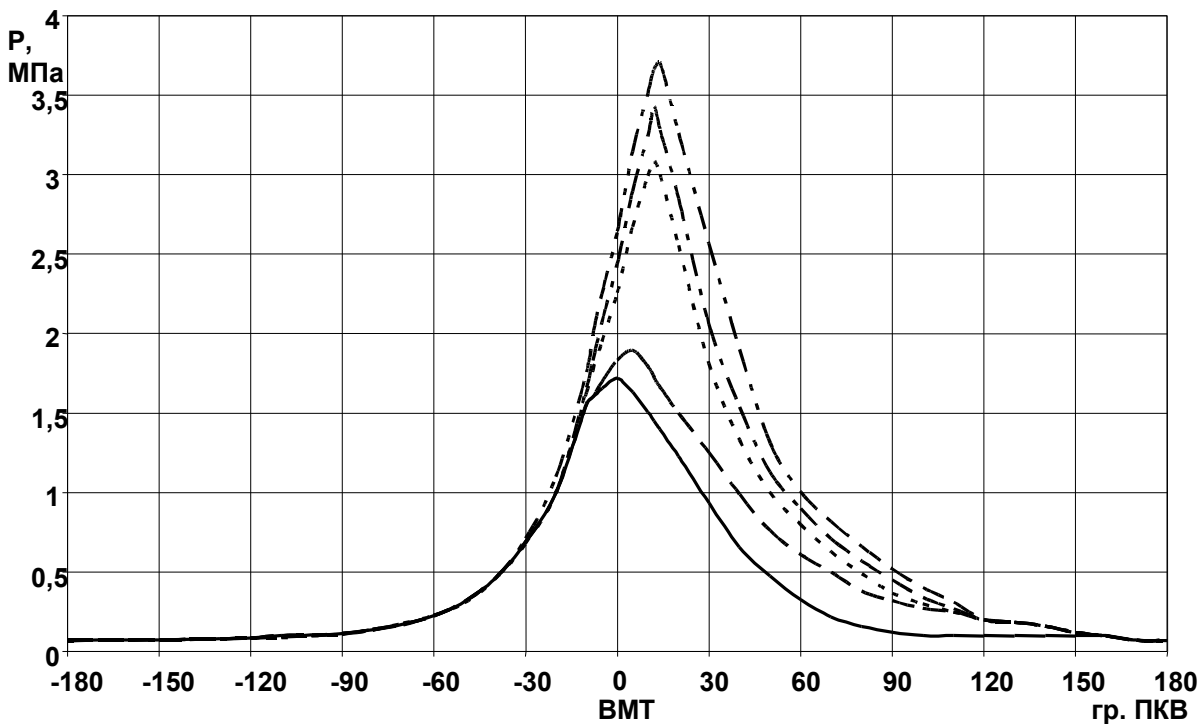


Рис. 3. Средние индикаторные диаграммы двигателя с системой НВТ

- сжатие - расширение
- — — — — $P_e=0,21$ МПа
- · · · $P_e=0,47$ МПа
- — — — — $P_e=0,06$ МПа
- · · · · $P_e=0,29$ МПа

По предложенной методике определен индикаторный КПД с учетом зависимостей $\eta_i = f(P_e)$ при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что максимальный действительный индикаторный КПД двухтактного двигателя ДН-4 с внешним смесеобразованием (карбюраторная система

питания) с учетом потерь топлива на продувку достигает $\eta_i' = 29,9\%$ в диапазоне нагрузок от $P_e = 0,325$ МПа до $P_e = 0,375$ МПа, а

при определении индикаторного КПД без учета потерь топлива на продувку – $\eta_i = 23,6\%$ ($P_e = 0,29-0,325$ МПа).

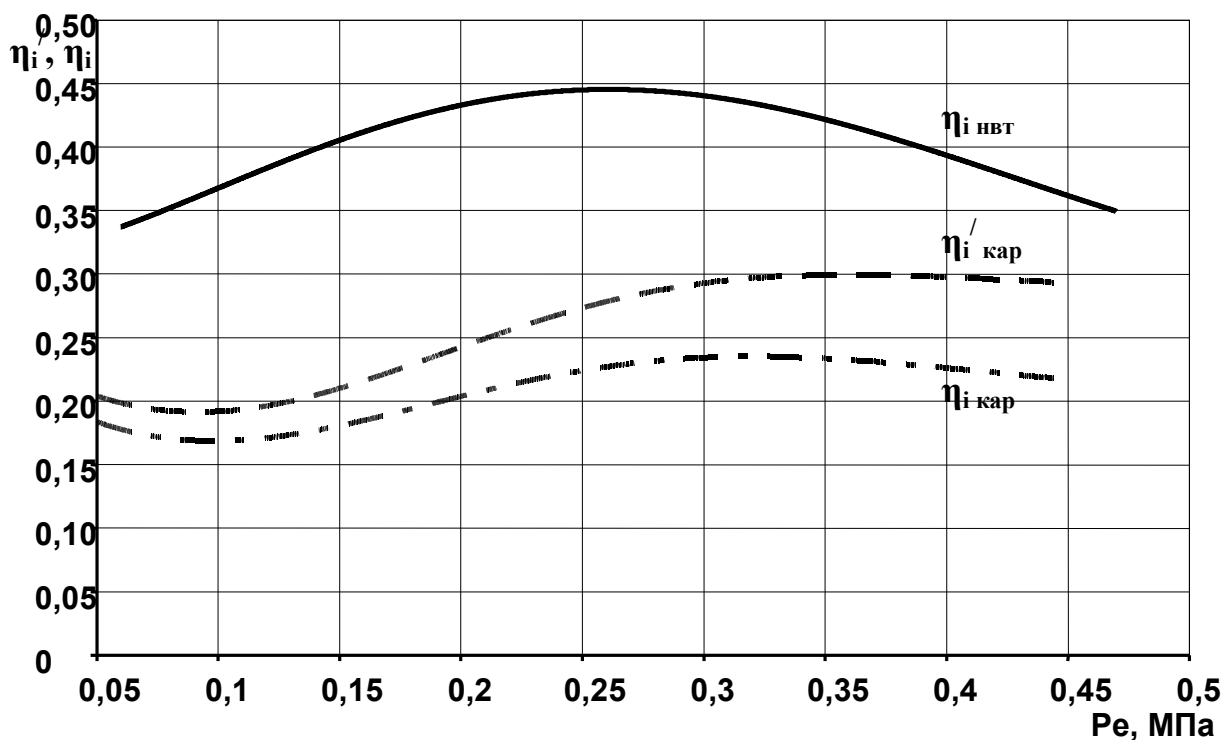


Рис. 4. Индикаторные КПД двигателя с НВТ и карбюратором по нагрузочным характеристикам при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

— η_i НВТ - - - η_i' карб - · - · η_i карб

Применение системы НВТ и эффективная организация внутрицилиндровых рабочих процессов с расслоением ТВЗ позволило повысить индикаторный КПД двухтактного двигателя с ИЗ до 44,2% при $P_e = 0,25-0,275$ МПа.

По результатам исследований установлено, что переход двухтактного двигателя ДН-4 с внешнего смесеобразования на внутреннее смесеобразование приводит к значительному снижению расхода топлива в 1,83 раза и выбросов ВВ с ОГ в 7-10 раз за счет исключения потерь топлива при продувке (v) в 1,1–1,27 раза и роста индикаторного КПД в 1,48 раза.

Выводы

В результате анализа экономических и эколо-

гических показателей двухтактного двигателя ДН-4 на режимах нагрузочной характеристики при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ с карбюратором и системой непосредственного впрыскивания топлива установлено:

1. Замена карбюраторной системы питания на непосредственный впрыск топлива позволяет снизить расход топлива в 1,83 раза и повысить эффективный КПД в 1,83 раза во всем диапазоне изменения нагрузок.
2. Повышение экономичности с применением непосредственного впрыска топлива происходит за счет исключения потерь топлива при продувке в 1,1–1,27 раза и роста индикаторного КПД в 1,48 раза.
3. Сравнение индикаторного КПД двухтактного двигателя с карбюратором и непосредственным

впрыском топлива необходимо правильно производить по индикаторному КПД, определение которого обосновано в методике [10], в которой учитывается только то топливо, которое осталось в цилиндре после закрытия органов газораспределения.

4. Применение непосредственного впрыска топлива при организации расслоения топливозвоздушной смеси снижает токсичность отработавших газов (CO , C_nH_m) двухтактного двигателя с искровым зажиганием в 7-10 раз.

Список литературы:

1. <http://www.ZA.ru> 2. Iver N.V. Technology and policy options to control emissions from in-use two – and three-wheelers // In Clearing the Air. Tata Energy Research Institute. – 2000. – №2. 3. Archer M, Bell G. Advanced Electronic Fuel Injection Systems – an Emissions Solution for both 2 – and 4–stroke Small Vehicle Engines // Synerject Systems Integration. – 2001. – № 1. 4. <http://www.evinrude.com> 5. Беляев I. В. Вибір основних параметрів двотактного двигуна з прямоточною продувкою для легкового автомобіля: Автореф. дис. ... кан. техн. наук: 05.04.02 / Харківська держ. акад. залізничного транспорту – Харків, 1999 – 14 с.
6. Крамар С. М. Покращення паливної економічності і зниження токсичності двотактних бензинових двигунів шляхом розділеної подачі свіжого заряду: Автореф. дис. ... кан. техн. наук: 05.05.03 / Нац. транспорт. універ. – К., 2004 – 20 с. 7. Юшин А. Е. Улучшение экономических и экологических показателей двухтактного бензинового ДВС с непосредственным впрыскиванием: Автореф. дис. ... кан. техн. наук: 05.04.02. / Рос. універ. дружбы народов – М., 1998 – 18 с. 8. Корогодський В. А. Вдосконалення процесів сумішоутворення та згоряння в двигунах з іскровим запалюванням при безпосередньому вприскуванні палива: Автореф. дис. ... кан. техн. наук: 05.05.03 / Національного технічного університету “ХПІ” – Харків, 2004 – 22 с. 9. Aprilia S.P.A., “DITECH, Direct Injection Technology”, Press release, May 2000. 10. Єроценков С. А., Корогодський В. А. Щодо індикаторного ККД двигунів внутрішнього згоряння. // Тез. доп. наук.-техн. конф. каф. акад. та спеціалістів залізнич. трансп. за міжнар. участю (17 – 19 квітня 2007 р.). – Харків: ХарДАЗТ, 2007.– с. 23.

УДК 621.43.031.3

С.А. Алёхин, канд. техн. наук, В.П. Герасименко, д-р техн. наук, И.А. Краюшкин инж., Ю.А. Анимов, канд. техн. наук

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОДНО- И ДВУХСТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА ДЛЯ НАДДУВА ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Применение турбонаддува – эффективное средство повышения литровой мощности двигателей внутреннего сгорания. Широкий спектр схем турбо-

наддува от простого механически приводимого компрессора до двухступенчатых систем с промежуточным охлаждением воздуха или с промежуточным