

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СГОРАНИЯ ПО ИНДИКАТОРНЫМ ДИАГРАММАМ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С КАРБЮРАТОРОМ И НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКОМ ТОПЛИВА

**В.А. Корогодский, к.т.н., О.В. Василенко, аспирант,
Украинская государственная академия железнодорожного
транспорта, г. Харьков**

***Аннотация.** Определено влияние протекания процессов сгорания при различных нагрузках по индикаторным диаграммам на двухтактном двигателе с искровым зажиганием, кривошипно-камерной продувкой в зоне основных эксплуатационных режимов работы. Выявлены и сравнены основные закономерности изменения показателей двигателя с внешним (карбюратор) и внутренним смесеобразованием (непосредственный впрыск топлива) по нагрузочным характеристикам.*

***Ключевые слова:** карбюратор, непосредственный впрыск топлива, степень сжатия.*

Введение

В связи с ужесточающимися требованиями к выбросам вредных веществ (ВВ) в отработавших газах (ОГ) [1], таких как NO_x , CO и C_nH_m в ДВС с искровым зажиганием (ИЗ), возникает потребность перехода от системы питания с внешним смесеобразованием (например карбюраторная система питания) к системе питания с внутренним смесеобразованием (непосредственный впрыск топлива). Применение непосредственного впрыскивания топлива (НВТ) в камеру сгорания (КС) с расслоением топливовоздушного заряда (ТВЗ) на режимах частичных нагрузок позволяет перейти на качественное или смешанное регулирование мощности, повысить технико-экономические показатели и снизить содержание ВВ в ОГ двигателя с ИЗ. Переход на НВТ в КС с расслоением ТВЗ позволяет повысить степень сжатия (ϵ) и увеличить термический КПД, и в свою очередь соответственно индикаторный и эффективный КПД.

Анализ публикаций

В настоящее время, при введении в странах Европейского Союза норм EVRO-V (2007 г.), а на территории стран СНГ – EVRO-II, производители ДВС с ИЗ разрабатывают и внедряют в производство системы питания для организации внутреннего смесеобразования, которые позволяют значительно снизить выбросы ВВ в ОГ и расход топлива [1]. Лидером по разработкам и внедрению систем НВТ на четырехтактных двигателях

являются: японские фирмы Mitsubishi Motors и TOYOTA, шведская фирма SAAB и французская фирма Renault с технологией GDI и французский концерн Peugeot – Citroen с системой HPI. Ведущие мировые производители BMW, Mercedes-Benz, Nissan, Volkswagen, Audi, Ford, Daimler Chrysler и т.д. так же довели экспериментальные образцы двигателей с системой НВТ и готовы к массовому производству [2]. Наиболее целесообразно применять НВТ в двухтактных двигателях с ИЗ. Это позволяет перейти на качественное или смешанное регулирование мощности, снизить расход топлива по отношению к карбюраторной системе питания на 10–30% за счет исключения потерь топлива при продувке и дополнительно – на 10–15% за счет организации расслоения ТВЗ. Таким образом, суммарную экономичность двухтактного ДВС с ИЗ можно повысить на 20–45% в зависимости от совершенства организации процессов газообмена и расслоения ТВЗ на частичных режимах работы двигателя, а также на 70–90% снизить выбросы ВВ в ОГ. При этом соответственно организация расслоения ТВЗ позволяет повысить степень сжатия (ϵ), исключая детонационное сгорание [3, 4, 5].

Цель и постановка задачи

Выявить и проанализировать основные закономерности изменения показателей процесса сгорания двухтактного двигателя с ИЗ при внешнем и внутреннем смесеобразовании на частичных нагрузках. Определить показатели процессов сгора-

ния по индикаторным диаграммам с карбюраторной системой питания и системой НВТ.

Анализ экспериментальных данных

Экспериментальные исследования проводились по нагрузочным характеристикам при $n=3000$ мин⁻¹ на двухтактном двигателе ДН-4М (S/D=87/82) с воздушным охлаждением, ИЗ и кривошипно-камерной продувкой. Во время эксперимента применялись две системы питания двигателя. Карбюраторная система питания обеспечивала внешнее смесеобразование при обогащенном составе топливо-воздушной смеси (ТВС) ($\alpha=0,8-0,9$), а система НВТ позволила организовать внутреннее смесеобразование с расслоением ТВЗ ($\alpha_{\Sigma}=1,4-2,0$) на частичных режимах работы двигателя и гомогенный состав ТВС при полной нагрузке ($\alpha=1$). Определить влияние протекания процессов сгорания при различных системах питания возможно путем индицирования двигателя. С этой целью на экспериментальном стенде (рис. 1) был установлен комплекс измерительной аппаратуры.

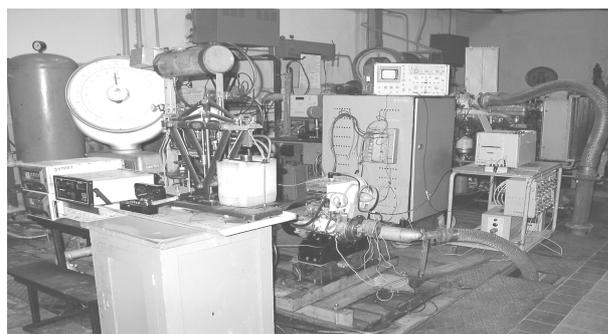


Рис. 1. Общий вид стенда на базе гидротормоза

Регистрация давления газов в цилиндре двигателя проводилась с помощью шлейфового осциллографа И-117/1 на кинолентку. Сигналы от тензодатчиков давления газов в цилиндре двигателя, давления топлива перед форсункой в системе топливоподдачи, от индуктивного датчика положения ВМТ и сигнала искрового разряда в системе зажигания подаются через тензоусилитель 8АНЧ-23 к шлейфам осциллографа. Встроенный в осциллограф генератор частоты формирует и подает на регистрацию отметку интервалов времени. Для визуального наблюдения изменения давления использовался двухканальный осциллограф С1-77.

В результате экспериментальных исследований получены многоцикловые и развернутые индикаторные диаграммы. Для наглядного примера представлены развернутые индикаторные диаграммы двигателя ДН-4М при частоте вращения коленчатого вала $n=3000$ мин⁻¹ и максимальной нагрузке $P_e=0,45$ МПа с карбюраторной системой питания (рис. 2а) и $P_e=0,47$ МПа с системой НВТ

и пленочным смесеобразованием (рис. 2б). На индикаторных диаграммах двигателя, как с карбюратором, так и системой НВТ отсутствуют признаки детонации.

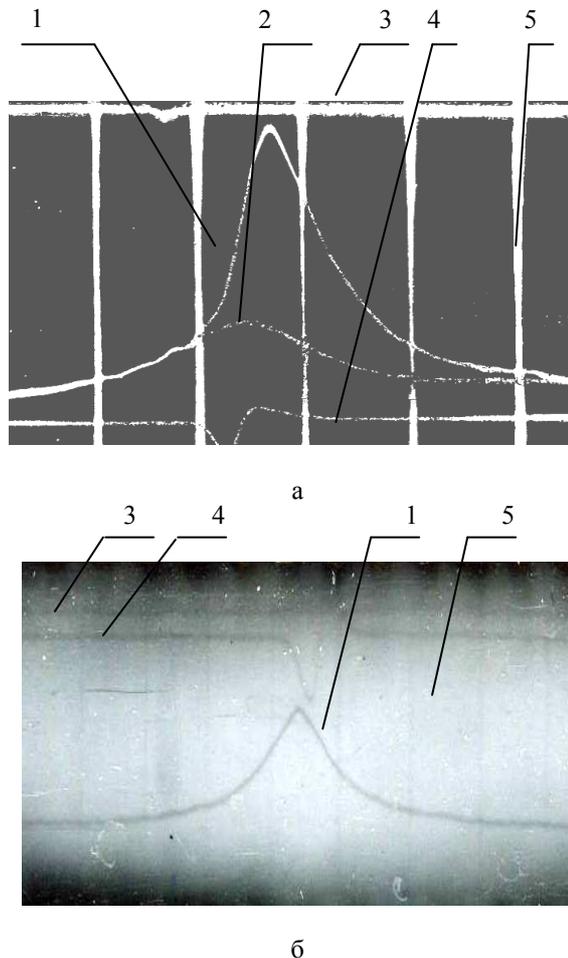


Рис. 2. Индикаторные диаграммы двигателя ДН-4М при $n=3000$ мин⁻¹: а – с карбюратором ($P_e=0,45$ МПа); б – с НВТ ($P_e=0,47$ МПа): 1 – давление газов в цилиндре при сгорании; 2 – давление газов в цилиндре без зажигания; 3 – отметка момента зажигания; 4 – отметка ВМТ; 5 – отметка времени

Для определения влияния протекания процессов сгорания по развернутым индикаторным диаграммам в начале были определены осредненные индикаторные диаграммы двигателя на различных режимах по нагрузочной характеристике при $n=3000$ мин⁻¹ с карбюраторной системой питания и с системой НВТ. Осредненная индикаторная диаграмма на определенном режиме определялась вначале по многоцикловым диаграммам, где устанавливалось p_z^{cp} , исходя из p_z^{max} и p_z^{min} . Затем по расчетному значению p_z^{cp} выбиралась соответствующая, наиболее близкая развернутая индикаторная диаграмма из 100 диаграмм, по которой рассчитывались основные показатели протекания процессов сгорания. При этом, используя полученные значения p_z^{cp} и формулу (1),

проведена оценка поцикловой неустойчивости [6].

$$\Delta = \frac{p_z^{\max} - p_z^{\min}}{p_z^{\text{cp}}} 100\%, \quad (1)$$

где p_z^{\max} – максимальное давление газов в цилиндре на многоцикловой диаграмме; p_z^{\min} – минимальное давление газов в цилиндре на многоцикловой диаграмме; p_z^{cp} – среднее расчетное значение давления газов в цилиндре по многоцикловой диаграмме.

Результаты расчета по формуле (1) представлены в табл. 1.

Таблица 1 Поцикловая неустойчивость последовательных циклов для внешнего и внутреннего смесеобразования при $n=3000\text{мин}^{-1}$

Нагрузка двигателя P_e , МПа	Поцикловая неустойчивость последовательных циклов – Δ , %	
	Карбюратор (внешнее смесеобразование)	НВТ (внутреннее смесеобразование)
0,06		21
0,05	48	
0,21		21
0,29		2
0,37	51	
0,4	48	
0,45	46	
0,47		6

Организация внутреннего, пленочного смесеобразования позволила более чем в 2 раза снизить неидентичность протекания процесса сгорания в последовательных циклах.

По полученным значениям p_z^{cp} выбираем соответствующие индикаторные диаграммы и преобразуем их в цифровой вид (рис. 3, 4). Схема обработки индикаторных диаграмм (рис. 5).

Согласно схеме (рис. 5) определены основные показатели процесса сгорания по осредненным индикаторным диаграммам для внешнего и внутреннего смесеобразования (табл. 2).

По данным табл. 2 построены зависимости показателей процесса сгорания (рис. 6 – 9) во всем диапазоне работы двигателя при $n=3000\text{ мин}^{-1}$.

На минимальной нагрузке давление P_c имеет большее значение в двигателе с НВТ, а при дальнейшем росте нагрузки значение P_c больше с карбюраторной системой питания. Это связано с тем, что двигатель с карбюратором имеет неизменный угол опережения зажигания ($\Theta_{\text{зак}}=27^\circ$ до

ВМТ, рис. 7), а при НВТ $\Theta_{\text{зак}}$ устанавливался оптимальный для каждого режима нагрузки, поэтому значения P_c по экспериментальным данным ниже во всем диапазоне изменения нагрузок у двигателя с НВТ.

Понижение значений P_c в двигателе с НВТ снижает индикаторную работу на такте сжатия. При этом определена зависимость $P_c = -3,5269P_e^2 + 3,8572P_e + 1,6105$, которая позволяет определить конкретное значение P_c при любой нагрузке двигателя данной организации рабочего процесса.

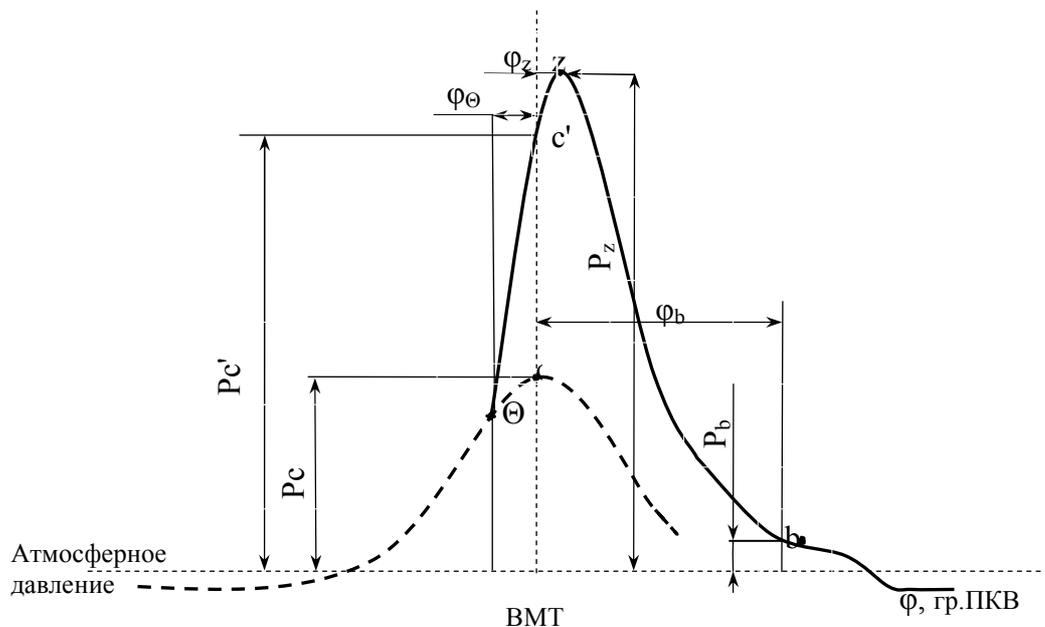
Важными факторами, влияющими на процесс сгорания и на показатели двигателя, являются: угол опережения зажигания ($\Theta_{\text{зак}}$) и максимальное давление сгорания (P_z). Значения этих параметров приведены на рис. 7, 8. В двигателе с внутренним смесеобразованием угол опережения зажигания ($\Theta_{\text{зак}}$) возрастает при повышении нагрузки (P_e). Изменение $\Theta_{\text{зак}}$ позволило повысить индикаторную работу, получить наиболее оптимальные показатели процесса сгорания и работы двигателя (рис. 7) [7]. Определена зависимость $\Theta_{\text{зак}} = 190,84P_e^2 - 41,291P_e + 7,0551$ изменения наиболее оптимального угла опережения зажигания при внутреннем смесеобразовании от нагрузки.

С повышением нагрузки возрастают максимальные значения давления газов в цилиндре (P_z) (рис. 8). В двигателе с карбюраторной системой питания изменение P_z при повышении нагрузки происходит практически по линейному закону. Максимальное давление газов в цилиндре соответствует

$P_z = 4,7$ МПа при $P_e = 0,45$ МПа. При использовании системы НВТ в диапазоне изменения нагрузки от $P_e = 0,23$ МПа до $P_e = 0,25$ МПа значения P_z практически сопоставимы с карбюраторной системой питания. Дальнейшее повышение нагрузки до максимальных значений ($P_e = 0,47$ МПа) приводит к снижению максимального давления сгорания ($P_z = 3,7$ МПа). Для внутреннего смесеобразования определена зависимость $P_z = -13,087P_e^2 + 11,324P_e + 1,2653$ изменения максимального давления сгорания в зависимости от нагрузки.

Важным показателем, характеризующим работу двигателя, является степень повышения давления λ при сгорании. Используя данные табл. 2, была построена зависимость $\lambda = f(P_e)$ (рис. 9).

Значение степени нарастания давления λ взаимосвязано с максимальным давлением сгорания (P_z) и давлением конца сжатия (P_c). Поэтому в двигателе с внутренним смесеобразованием λ меньше, чем в двигателе с внешним смесеобразованием во всем диапазоне нагрузок (рис. 10). При нагрузках от P_e^{\min} до $0,5P_e^{\max}$ значения степени повышения давления λ в двигателе с карбюратором до 10% больше, чем с НВТ. В диапазоне нагрузок от



- диаграмма давления газов в цилиндре без зажигания
- диаграмма давления газов в цилиндре при сгорании

Рис. 5. Схема обработки индикаторной диаграммы

Таблица 2 Результаты обработки индикаторных диаграмм

Показатели процесса сгорания	Тип смесеобразования							
	Внутреннее (непосредственный впрыск топлива)				Внешнее (карбюратор)			
P_e , МПа	0,06	0,21	0,29	0,47	0,05	0,37	0,4	0,45
P_z , МПа	1,89	3,09	3,43	3,7	1,7	4,1	4,5	4,7
P_c , МПа	1,7	1,7	1,7	1,7	1,47	1,47	1,47	1,47
$P_{c'}$, МПа	1,83	2,26	2,44	2,64	1,67	3,71	3,75	3,85
φ_z , от ВМТ до Z гр. ПКВ	5	11	12	13	10	10	10	10
φ_θ , от Θ до ВМТ, гр. ПКВ	5	8	10	30	27	27	27	27
φ_b , от ВМТ до b гр. ПКВ	102	102	102	102	102	102	102	102
λ (степень повышения давления)	1,11	1,82	2,02	2,18	1,16	2,78	3,06	3,19
ρ (степень предварительного расширения)	1,03	1,13	1,16	1,18	1,02	1,02	1,02	1,02
δ (степень последующего расширения)	8,2	7,44	7,28	7,12	5,94	5,94	5,94	5,94

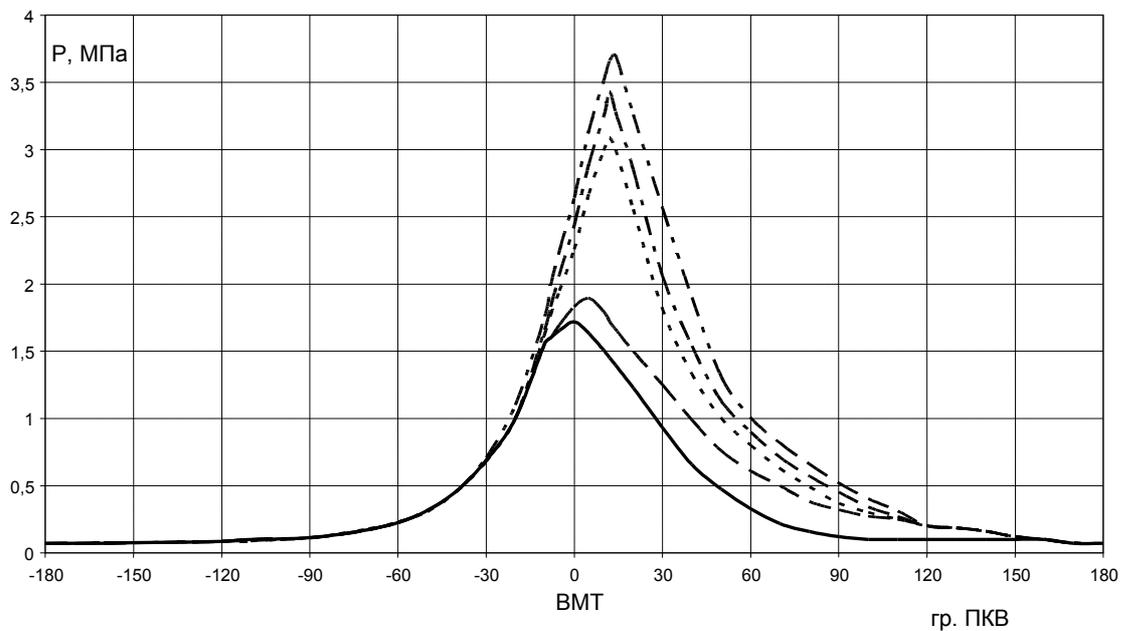


Рис. 3. Осредненные индикаторные диаграммы двигателя при НВТ

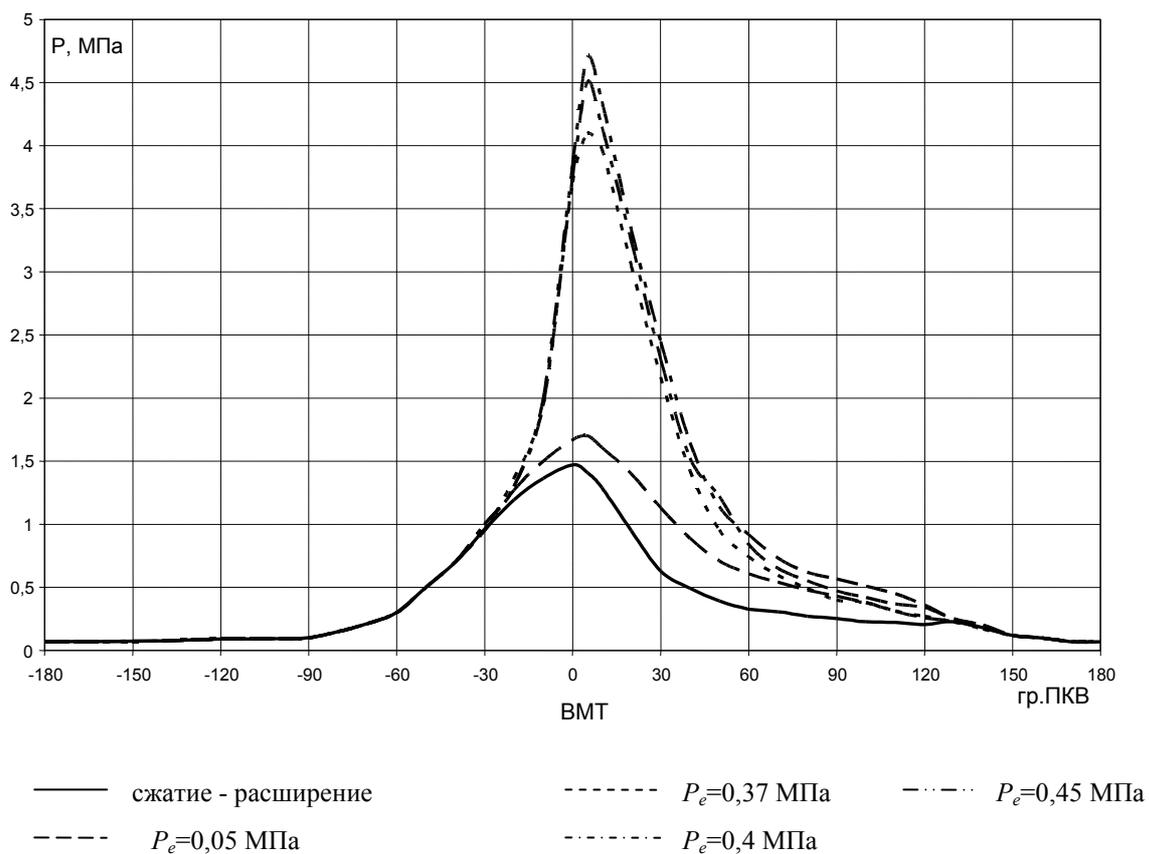


Рис. 4. Осредненные индикаторные диаграммы двигателя с карбюраторной системой питания

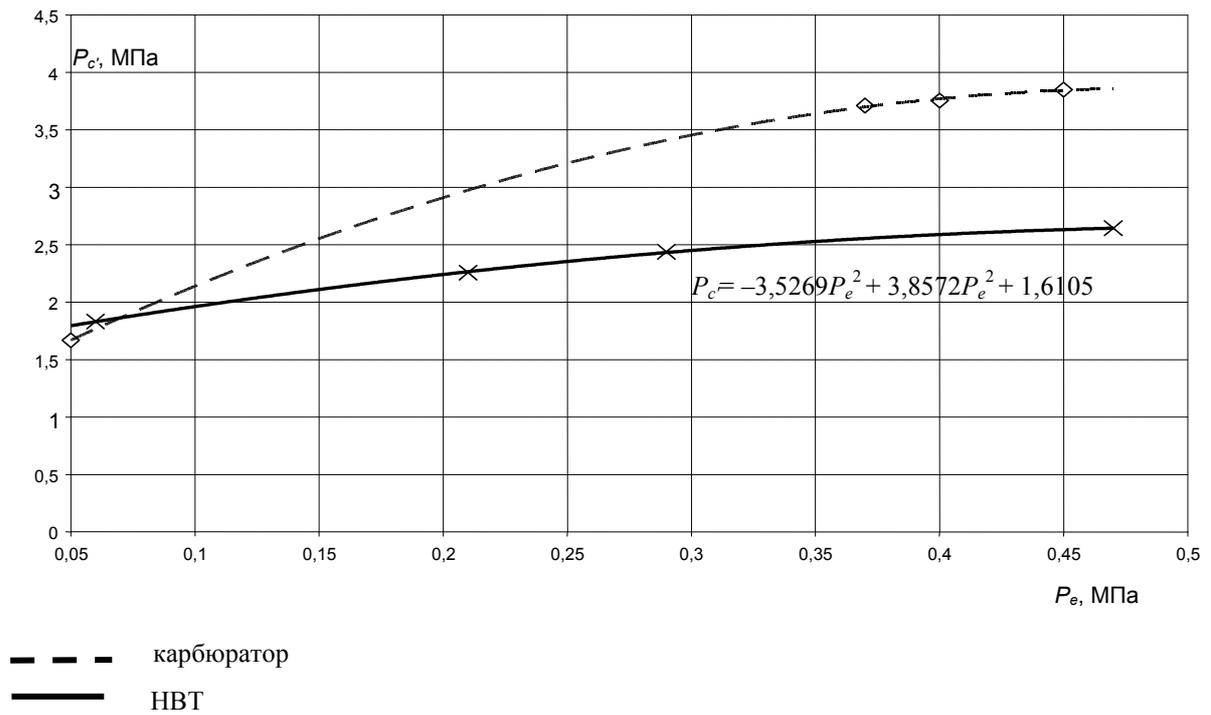


Рис. 6. Зависимость давления газов в цилиндре при ВМТ ($P_c = f(P_e)$)

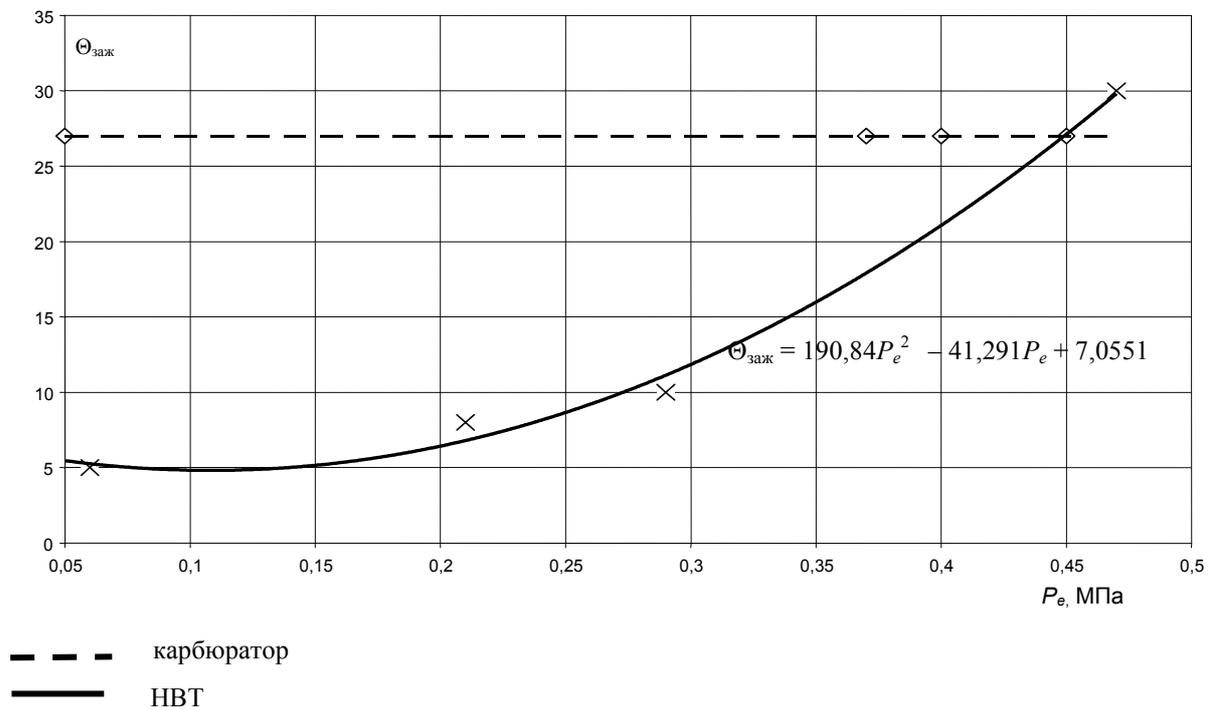
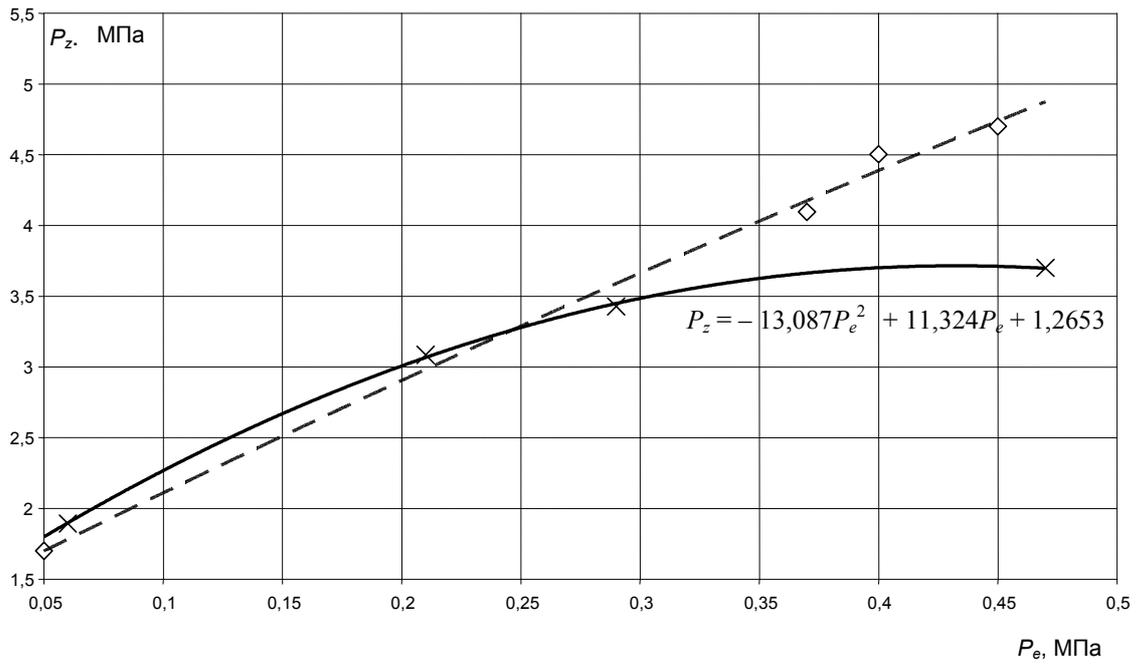
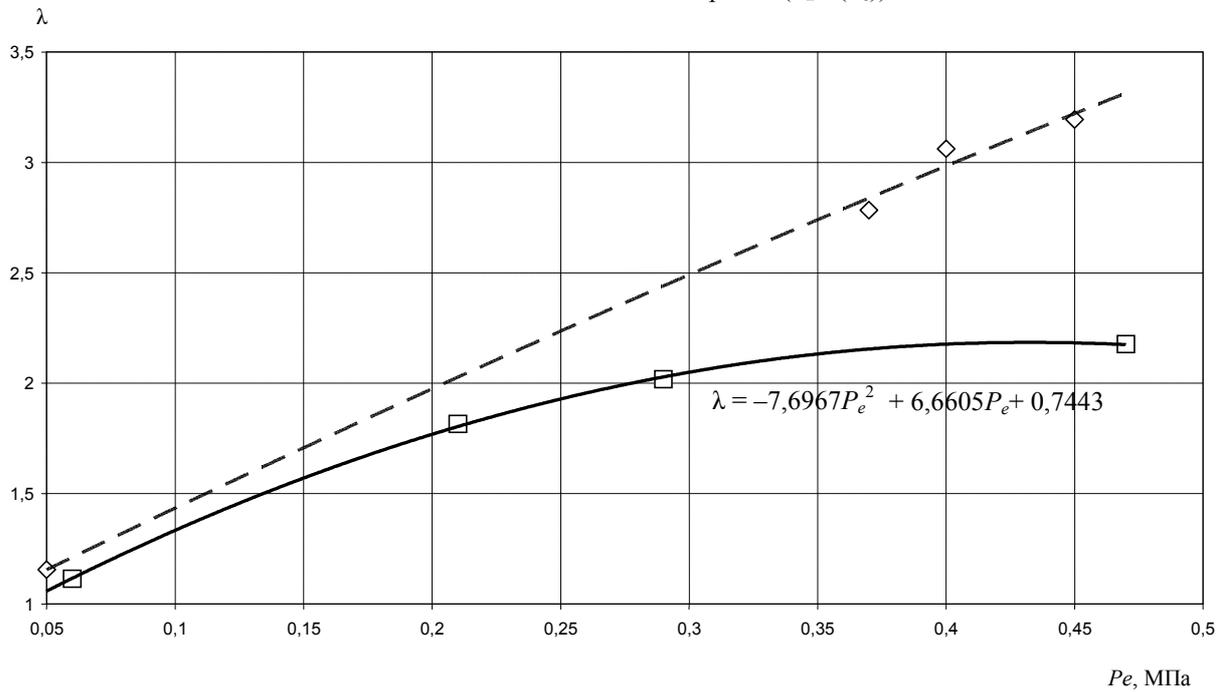


Рис. 7. Угол опережения зажигания ($\Theta_{зж} = f(P_e)$)



--- карбюратор
 — НВТ

Рис. 8. Максимальное давление сгорания ($P_z=f(P_e)$)



--- карбюратор
 — НВТ

Рис. 9. Степень повышения давления ($\lambda = f(P_e)$)

0,5 P_e^{\max} до P_e^{\max} рост и значения степени повышения давления λ в двигателе с карбюратором в среднем на 25% больше, чем при использовании НВТ. Максимальное значение $\lambda=2,1$ при максимальной нагрузке ($P_e=0,47$ МПа) соответствует двигателю с НВТ. При этом для определения степени нарастания давления λ в зависимости от нагрузки определена зависимость $\lambda = -7,6967P_e^2 + 6,6605P_e + 0,7443$.

Выводы

Применение НВТ в двухтактном двигателе с искровым зажиганием и организация пленочного смесеобразования обеспечило снижение максимального давления сгорания (P_2) на 20% и снижение значений степени повышения давления λ , что позволило снизить температуру при сгорании и исключить детонационное сгорание при повышении степени сжатия до $\epsilon=12$.

Определение и анализ показателей процесса сгорания (степени предварительного расширения (ρ) и степени последующего расширения (δ)), характеризующих протекание процесса сгорания от начала воспламенения до открытия выпускного окна и соответственно индикаторную работу газов в объеме двигателя за цикл. будет представлено в последующей публикации.

Литература

1. Системы управления бензиновыми двигателями: Пер. с нем. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2005. – 432 с.
2. Корогодский В.А., Обозний С.В. Вплив способу регулювання потужності двотактного

двигуна з іскровим запалюванням на показники робочих процесів // Теплоенергетичні установки та екологія на залізничному транспорті: Міжвуз. зб. наук. пр. / Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Х.: УкрДАЗТ, 2005. – Вип. 70. – С. 62-72.

3. Корогодский В.А., Обозний С.В. Организация пленочного смесеобразования и определение степени расслоения заряда в двухтактном двигателе с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива // Двигатели внутреннего сгорания / Научн. техн. журнал. – Харьков. – 2003. – № 1–2. – С. 41–48.
4. G.K. Fraidl, W.Piock, M. Wirth. Strait to the Point // Engine technology international. – UK and International Press; November, 1997. – P. 30–31.
5. <http://www.evinrude.com>
6. Корогодский В.А. Оценка цикловой нестабильности последовательных циклов двухтактного двигателя с искровым зажиганием при внутреннем и внешнем смесеобразовании // Автомобильный транспорт / Сб. научн. трудов. – Харьков: ХНАДУ. – 2003. – Вып. 13. – С. 241–248.
7. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2007 г.

