

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА И ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

С.А. Ерощенко, В.А. Корогодский, Е.П. Воропаев, О.В. Василенко

Проведены расчетно-экспериментальные исследования двигателя оборудованного системой непосредственного впрыскивания топлива. Выбранная математическая модель с высокой точностью описывает процессы, протекающие в двигателе при использовании непосредственного впрыскивания с расслоением исходного рабочего тела в цилиндре двигателя.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, непосредственный впрыск топлива, расслоение исходного рабочего тела, двухтактный двигатель.

Метод математического моделирования рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) нашел широкое применение в практике их исследования и доводки. Он позволяет оценить влияние конструктивных, регулировочных и параметров окружающей среды, а также эксплуатационных факторов на технико-экономические показатели ДВС.

На настоящее время разработано достаточно большое количество таких моделей. При всем многообразии среди них можно выделить два класса: термодинамические [1] и газодинамические [2]. В настоящем исследовании используется термодинамическая модель, изложенная в работах [3,4]. В модели используется зонный подход, то есть газоз-воздушный тракт двигателя (рисунок 1) разбивается на ряд зон (по назначению) и для каждой зоны составляются уравнения сохранения энергии, массы, уравнения состояния и изменения объема зоны. Стыковка зон производится по равенству потоков энергии и массы на выходе из предыдущей зоны и входе последующей. Процессы тепловыделения при сгорании топлива и теплообмена в цилиндре двигателя моделировались с использованием формул Вибе И.И. [9] и Г.Вошни [10]. При этом значения (m) и (φ_z) в формуле Вибе И.И. определялись на основании эксперимента.

В математическую модель введены два дополнительных коэффициента - L , L' : соответственно абсолютный и относительный коэффициент превышения нижнего предела распространения фронта пламени в бензовоздушных смесях в ДВС. Использование данных коэффициентов позволяет хотя бы качественно оценивать влияние процессов

смесеобразования в цилиндре на показатели двигателя в целом. Значение введенных коэффициентов находятся по формулам

$$L = (\alpha_c - 1,35) / 1,35 = ((\alpha - \alpha \cdot u) - 1,35) / 1,35; \quad (1)$$

$$L' = \alpha_c / 1,35 = (\alpha - \alpha \cdot u) / 1,35; \quad (2)$$

где обозначено: α - суммарный коэффициент избытка воздуха двигателя; α_c - средний коэффициент избытка воздуха в цилиндре двигателя; u - коэффициент утечки продувочного воздуха; 1,35- нижний предел распространения фронта пламени в бензовоздушных смесях в ДВС (принятое значение [5,6] является ориентировочным, так как в общем случае оно зависит от давления и температуры в цилиндре, а также качества или состава исследуемого бензина.

Экспериментальные исследования проводились на кафедре ДВС НТУ "ХПИ" на базе двухтактного двигателя ДН-4М (S/D=87/82) с искровым зажиганием (ИЗ), оборудованного системой непосредственного впрыскивания топлива (НВТ). Применение системы непосредственного впрыскивания топлива и организация смесеобразования с расслоением исходного рабочего тела позволяет повысить экономические и экологические показатели двигателя. При этом под расслоением исходного рабочего тела подразумевается отделение топливно-воздушного заряда от воздушного в рабочем объеме цилиндра (или в рабочей полости двигателя).

Целью исследований являлось определение основных технико-экономических показателей работы двигателя с помощью математической модели и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, полученными на двигатели ДН-4М с системой НВТ.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА И ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ

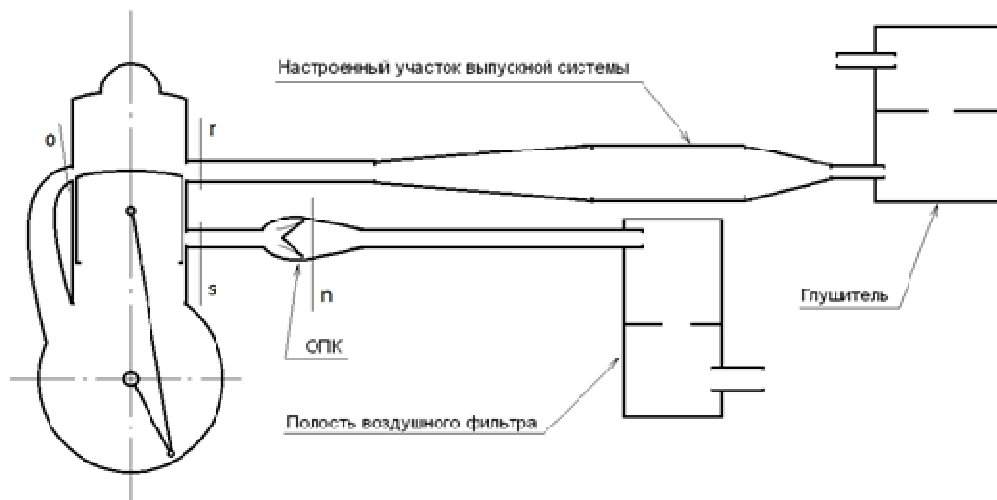


Рисунок 1 - Схема газозвудушного тракта с разделением на зоны

На рисунке 2 представлены индикаторные диаграммы, полученные путем математического моделирования и в результате обработки результатов эксперимента. Расчетная индикаторная диаграмма с достаточно высокой точностью описывает диаграмму, полученную в результате экспериментальных исследований [7]. Максимальное отклонение имеет место на участке 10 – 14° поворота коленчатого вала после верхней мертвой точки и составляет порядка 0,2 МПа, что не превышает допустимого отклонения в 5%.

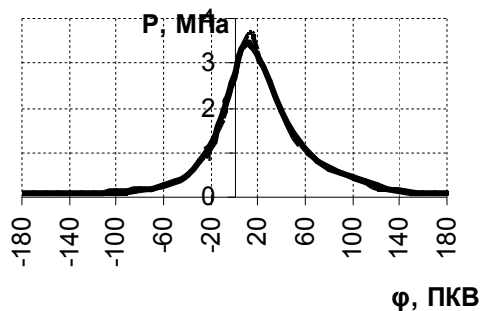


Рисунок 2 - Индикаторные диаграммы двигателя при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузке $P_e=0,47 \text{ МПа}$

— — — — — моделирование
— — — — — эксперимент

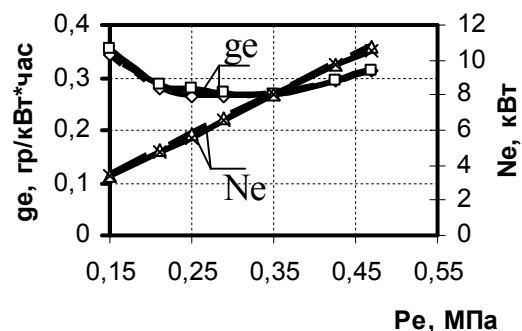


Рисунок 3 - Нагрузочные характеристики $g_e=f(P_e)$ и $N_e=f(P_e)$ при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

— — — — — моделирование
— — — — — эксперимент

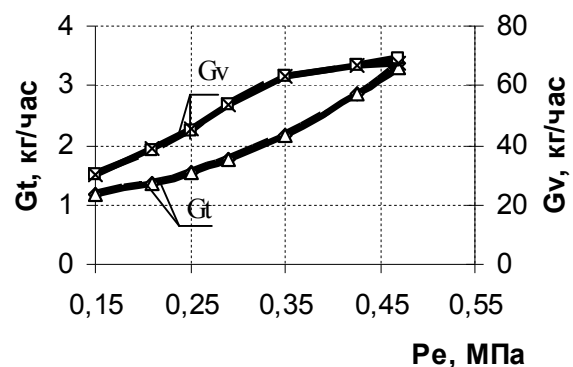


Рисунок 4 - Нагрузочные характеристики $G_t=f(P_e)$ и $G_v=f(P_e)$ при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

— — — — — моделирование
— — — — — эксперимент

На рисунке 3 представлены удельные нагрузочные характеристики изменения эффективного расхода топлива (g_e) и эффективной мощности (N_e) при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$. На рисунке 3 видно, что расчетные и экспериментальные кривые $g_e=f(P_e)$ и $N_e=f(P_e)$ практически совпадают. Отличие не превышает $\pm 4\%$ в области $0,15 \div 0,3 \text{ МПа}$.

На рисунке 4 представлены нагрузочные характеристики изменения часового расхода топлива (G_t), и часового расхода воздуха (G_v) при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$. Видно, что различия между

расчетными и экспериментальными значениями G_t и G_v имеет место только в области $P_e=0,45 \pm 0,47$ МПа и не превышает 1,8%.

На рисунке 5 представлены кривые изменения показатели качества газообмена двигателя ДН-4М с системой НВТ при $n=3000$ мин⁻¹. Видно, что расчетные значения (α) и ($\alpha_{ц}$) с высокой точность совпадают с результатами экспериментальных исследований,

только на участке $P_e=0,15 \pm 0,35$ МПа имеет место отклонения значений $\alpha_{ц}$ на 4,5%.

Коэффициент утечки продувочного воздуха (u) полученный расчетным методом отличается от экспериментального на участках нагрузки от 0,15 до 0,29 и от 0,42 до 0,47 МПа в среднем на 8%. Отличия в величинах коэффициента остаточных газов (γ) [8] и коэффициента наполнения (η_v) на участке

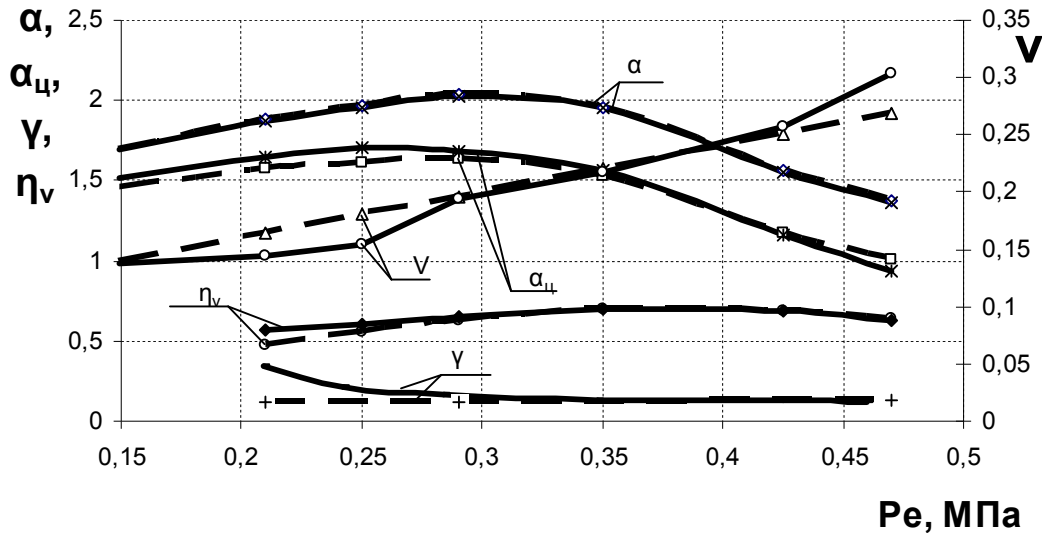


Рисунок 5 - Нагрузочная характеристика $\alpha = f(P_e)$, $\alpha_{ц} = f(P_e)$, $u = f(P_e)$, $\gamma = f(P_e)$, $\eta_v = f(P_e)$ при $n=3000$ мин⁻¹

— моделирование - - - эксперимент

Можно предположить, что экстремальные значения L , L' на участке нагрузки от 0,21 до 0,29 МПа соответствуют максимальному расслоению исходного рабочего тела. При нагрузке от 0,37 МПа и выше где L , L' пересекают соответственно значения 0 и 1, можно предположить отсутствие расслоения исходного рабочего тела.

Также в работе на основе экспериментальных данных были получены эмпирические формулы (3-6) для определения показателя характера сгорания (m) и продолжительности сгорания (φ_z) для двигателя ДН-4М с НВТ при $n=3000$ мин⁻¹ в зависимости от G_t , угла опережения зажигания ($\Theta_{зж}$), угла начала впрыскивания топлива ($\varphi_{впр}$), и L , L' :

$$m = 1,088 - 4,89 \cdot 10^{-3} G_t + 1,496 \cdot 10^{-3} \Theta_{зж}^2 + 6,654 \cdot 10^{-6} \varphi_{впр}^3 - 20,851 L'^4 - 0,103 L'^5 \quad (3)$$

$$m = 0,1256 G_t - 0,0115 \Theta_{зж} - 0,0178 \varphi_{впр} + 1036,5172 L' - 1036,7294 L + 1038,97 \quad (4)$$

$$\varphi_z = -145,693 - 8,935 G_t + 0,36 \Theta_{зж}^2 + 2,64 \cdot 10^{-3} \varphi_{впр}^3 - 2,488 \cdot 10^3 L'^4 - 20,093 L'^5 \quad (5)$$

$$\varphi_z = 35,695 G_t - 3,5806 \Theta_{зж} - 1,9632 \varphi_{впр} + 359226,3 L' - 359190,6 L + 359291,6 \quad (6)$$

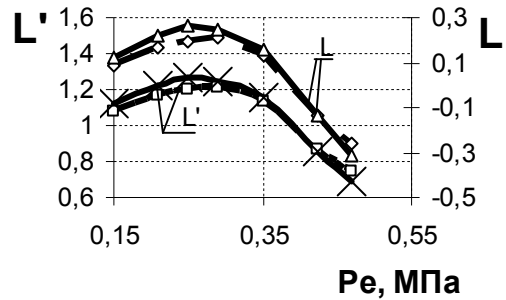


Рисунок 6 - Нагрузочные характеристики $L = f(P_e)$, $L' = f(P_e)$ при $n=3000$ мин⁻¹

— моделирование - - - эксперимент

Приведенные эмпирические формулы с высокой точность описывают значения (m) и (φ_z) во всем диапазоне нагрузок. Для более высокой точности определения (m) и (φ_z) рекомендуется использовать формулы (4) и (5) на нагрузках от 0,15 до 0,42 МПа, а формулы (3) и (6) при нагрузках от 0,42 до 0,47 МПа.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА И ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

Выводы

1. Используемая математическая модель с высокой точностью описывает процессы, протекающие в ДВС при использовании НВТ с расслоением исходного рабочего тела (под расслоением исходного рабочего тела следует понимать отделение топливно-воздушного заряда от воздушного в рабочем объеме цилиндра)

2. Отличия в величинах эффективных показателей ДВС полученных расчетным и экспериментальным методом не превышает $\pm 5\%$.

3. Предложенные коэффициенты L , L' позволяют хотя бы качественно (или ориентировочно) оценить влияние процессов смесеобразования в цилиндре на показатели двигателя в целом

5. Получены эмпирические формулы для определения (m) и (φ_z) для двигателя ДН-4М при $n=3000$ мин⁻¹ в зависимости от G_t , $\Theta_{зак}$, $\varphi_{впр}$, L , L' :

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крушедольський О. Г. Моделювання робочих процесів транспортних дизелів на експлуатаційних режимах [Текст] / О. Г. Крушедольський // Навчальний посібник. УкрДАЗТ.- Харків, 2007.- 220 с.

2. Солодов В.Г. Научно-прикладной программный комплекс MTF[®] для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы / В.Г Солодов, Ю.В. Стародубцев // Сертификат гос. регистр. авторских прав.- УГААСП.- № 5921.- 16.07.2002.

3. Егоров Я. А. Физико-математическая модель рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания автотракторного типа [Текст] / Я.А. Егоров // Учебное пособие.- Киев, 1991.- 56 с.

4. Егоров Я. А. Многостадийная физико-математическая модель процесса газообмена в высокооборотном двухтактном ДВС / Я. А. Егоров, Е.П. Воропаев // Сборник "Авіаційно-космічна техніка і технологія", ХАИ, Выпуск 26 , 2001 г.

5. Соколик А.С. Самовоспламенение пламя и детонация в газах [Текст] / А.С. Соколик // - М.: АН СССР, ИХФ АН СССР, 1960. - 422 с.

6. Ерощенко С.А. Сравнение показателей двигателя с искровым зажиганием при непосредственном впрыскивании топлива с расслоением и обеднением топливно-воздушной смеси / С.А. Ерощенко, В.А. Корогодский, О.В. Василенко, С.В. Обозный // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 132. – С.68-72.

7. Корогодский В.А. Определение показателей сгорания по индикаторным диаграммам двухтактного двигателя с карбюратором и непосредственным впрыском топлива / В.А. Корогодский, О.В. Василенко // Сб. науч. трудов. Вестник ХНАДУ. – Харьков: ХНАДУ. – 2007. – Вип. 37. – С. 60-67.

8. Ерощенко С.А. Определение коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с искровым зажиганием / С.А. Ерощенко, В.А. Корогодский, А.А. Хандримайлов, О.В. Василенко // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2011. – №2. – С. 13–19.

9. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе // МАШГИЗ- М.-272с.

10. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова // М.: Машиностроение, 1983 . – 372 с.

Ерощенко С.А., д.т.н., проф.

Корогодский В.А., к.т.н., доц.

e-mail: korogodskiy@mail.ru

Воропаев Е.П., аспирант,

Василенко О.В., ассистент,

e-mail: 80673966747@mail.ru

Украинская Государственная Академия Железнодорожного Транспорта, кафедра «Теплотехники и тепловых двигателей» г. Харьков.