

*Б.Г. Тимошевський, д-р техн. наук, М.Р. Ткач, д-р техн. наук,
О.С. Митрофанов, асп., А.С. Познанський, асп., А.Ю. Проскурін, асп.*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОРШНЕВОГО ДВЗ З СИСТЕМОЮ ТЕРМОХІМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ БІОЕТАНОЛУ

Постановка проблеми

На сьогодні палива нафтового походження є головними джерелами енергії в ДВЗ. За оцінками фахівців, запаси нафти будуть практично повністю вичерпані в найближчі 50-60 років. Тому особлива увага в сучасному двигунобудуванні приділяється розробці технологій використання альтернативних джерел енергії. Одним з найпоширеніших і широко використовуваних в ДВЗ альтернативних палив є біоетанол. Одним з перспективних на сьогодні способів використання біоетанолу у ДВЗ є термохімічна конверсія. Незважаючи на простоту і можливість рішення великого числа проблем на основі цього способу, низка теоретичних і практичних запитань, пов'язаних з його реалізацією в ДВЗ, залишається ще маловивченими.

Аналіз досліджень та публікацій. Головною перевагою біоетанолу перед нафтопродуктами є те, що він відноситься до поновлюваних джерел енергії. Нині велика частина біоетанолу виробляється з кукурудзи (США) і цукрової тростини (Бразилія). Сировиною для виробництва біоетанолу також можуть бути різні с/г культури з великим змістом крохмалю або цукру: маніок, картопля, цукровий буряк, батат, сорго, ячмінь і ін. Відомо, що найбільш доцільною, з економічної точки зору, сировиною для виробництва біоетанолу в Україні є кукурудза [1].

Біоетанол, в основному, використовується в автомобільних двигунах з іскровим запалюванням в якості добавки до бензину (E10, E25, E85) або в якості єдиного палива. Основними недоліками біоетанола є знижена теплота згорання ($Q_n = 26,78$ МДж/кг), висока теплота випару і низький тиск насиченої пари. До основних переваг можна віднести високі антидетонаційні властивості та понижений вміст токсичних речовин у відпрацьованих газах [2].

Термохімічна конверсія біоетанолу дозволяє не лише поліпшити паливно-економічні і екологічні характеристики, але і кінетичні показники процесу згорання.

Суть способу полягає в наступному: під впливом теплоти, яка відбирається від ВГ двигуна в

термохімічному реакторі, відбувається ендотермічна реакція хімічного перетворення біоетанолу, в результаті якої утворюється синтез-газ – суміш CO і H_2 . Хімічна енергія отриманого синтез-газу перевищує енергію використаного біоетанолу на величину, рівну кількості утилізованої теплоти ВГ, яка разом з отриманим паливом вводиться в двигун для повторної участі в організації робочого циклу. В даному випадку термохімічний реактор виконує функцію пристрою утилізації.

Цей спосіб був запропонований ще в 60-і роки ХХ сторіччя при вирішенні задачі про утилізацію теплоти продуктів згорання з каналів МГД-генератора. Потім він був поширений і на інші типи теплоенергетичних і теплотехнологічних установок [3]. Нині більшість досліджень присвячена застосуванню термохімічної конверсії на двигунах малої потужності, які використовують метанол [4], метан [5] і біогазу [6].

Первинна оцінка ефективності термохімічної конверсії біоетанолу може бути встановлена при порівнянні теплотворної здатності рідкого біоетанолу і газоподібних продуктів його конверсії. Так, при згорянні 1 кг рідкого біоетанолу виділяється 26,78 МДж теплової енергії. А продукти конверсії тієї ж маси біоетанолу виділяють 34,87 МДж, тобто на 23,2% більше. Збільшення теплотворної здатності синтез-газу відносно вихідного біоетанолу пояснюється тим що в систему було внесено відповідну додаткову кількість енергії (теплота реакції конверсії), що не суперечить положенням термодинаміки [7].

Мета роботи – створення експериментального стенду для дослідження параметрів роботи двигуна, що працює на синтез-газі, отриманого шляхом парової конверсії біоетанолу.

Виклад основного матеріалу

При проектуванні енергетичної установки з системою термохімічної конверсії біоетанолу необхідне одночасне виконання 2 умов, які визначають границі її ефективного використання:

1) система термохімічної конверсії в широкому діапазоні температур ВГ повинна забезпечувати

максимальний ступінь перетворення (конверсії) біоетанолу в синтез-газ;

2) синтез-газ, на якому працює двигун, не повинен погіршувати енергетичні, експлуатаційні і екологічні характеристики його роботи.

Також особлива увага приділяється питанням проектування високоефективного термохімічного реактора та вивченню особливостей робочого циклу ДВЗ, працюючого на суміші газів CO та H₂.

З метою детального вивчення цих питань в Центрі Перспективних Енергетичних Технологій Національного Університету Кораблебудування ім.адм. Макарова була розроблена і сконструйована експериментальна установка, за допомогою якої досліджуються особливості роботи автомобільного двигуна з ТХУ тепла ВГ, який працює на продуктах конверсії біоетанолу. Схема установки представлена на рис.2., його фотографії – на рис. 1,4,5. Експериментальна установка складається з:

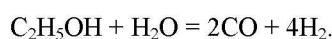
1) Підсистеми по дослідженню параметрів процесу парової конверсії біоетанолу в термохімічному реакторі;

2) Підсистеми по дослідженню параметрів робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням, працюючому на синтез-газі різного складу;

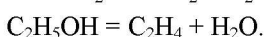
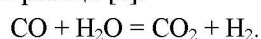
3) Підсистеми вимірювань.

Дослідження процесу парової конверсії біоетанолу у термохімічному реакторі

Основна реакція конверсії біоетанолу у синтез-газ є:



Окрім цього в системі протікають наступні основні побічні реакції [8]:



Одними з найважливіших параметрів, які характеризують процес хімічного перетворення вихідного палива, є ступінь конверсії (кількість прореагованого біоетанолу), а також температура процесу перетворення, тиск у реакторі, співвідношення вихідних компонентів реакції.

Метою дослідження є визначення залежності ступеня конверсії від основних параметрів процесу парової конверсії та геометричних характеристик реактора.

Стенд для отримання синтез-газу (рис.1) обладнаний регулюючими органами з дистанційним управлінням, штатними вимірювальними прилада-

ми, контрольними вимірювальними приладами і системою первинних датчиків для забезпечення автоматизації проведення експерименту.



Рис. 1. Експериментальний стенд для отримання синтез-газу

Установка складається (рис.2) безпосередньо з теплообмінного апарату (реактору витіснення) 28, електропечі 27, конденсатора 29, а також приладів вимірювання температури і тиску.

Швидкість протікання реакції забезпечується за рахунок встановлення необхідного значення тиску інертного газу, який поступає з балона 23, на редукційному клапані тиску 24. Інертний газ, у свою чергу, витісняє водно-спиртову суміш з реторти 25 в теплообмінний апарат 28, в якому і протікає некаталітична конверсія біоетанолу. Підведення тепла відпрацьованих газів ДВЗ з температурою 400...500 °С, необхідного для протікання реакції, імітується за допомогою електропечі 27.

Охолодження продуктів конверсії і очищення від залишків води та спирту, що не прореагував забезпечується за допомогою конденсатора 29. Конденсатор представляє собою теплообмінний апарат типу труба в трубі із загальним протитоком. Водяна пара і елементи, що не прореагували, збираються в реторті з сконденсованою сумішшю 31.

Кількість сировини, яка прореагувала, визначена шляхом зважування реторти 25 з водно-спиртовою сумішшю до початку експерименту і після закінчення експерименту за допомогою електронних вагів 26.

Кількість суміші, що сконденсувалася після охолодження в конденсаторі також визначається шляхом зважування за допомогою електронних вагів 30.

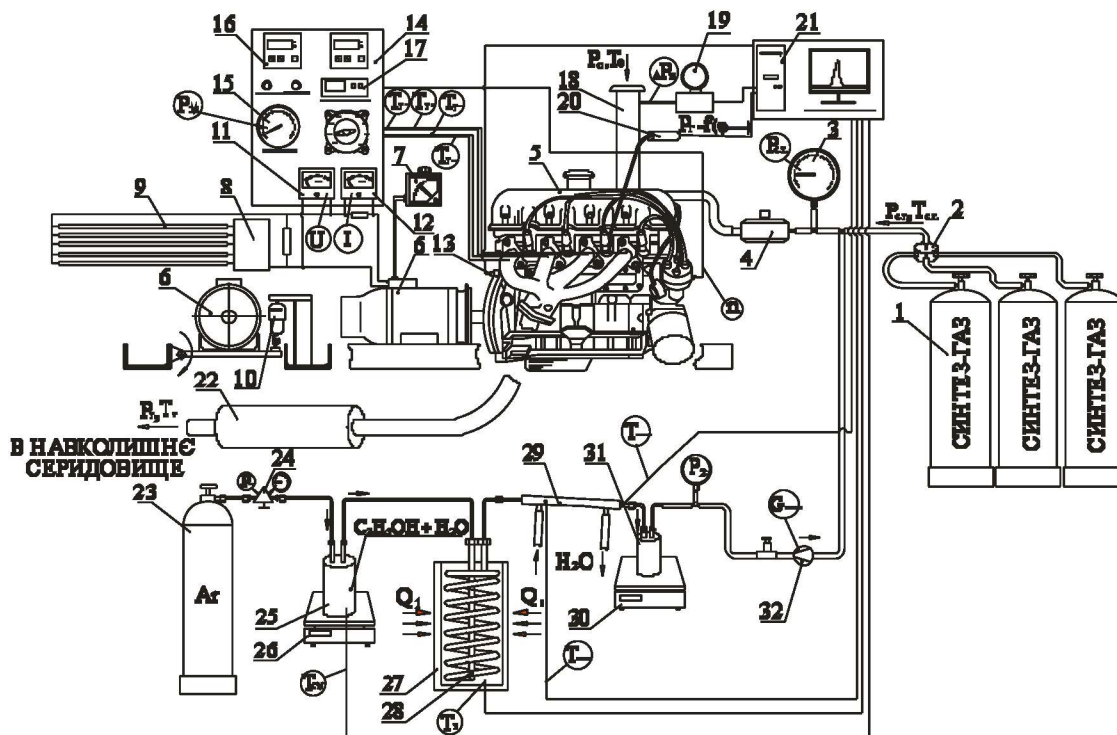


Рис. 2. Принципова схема експериментальної установки

Кількість синтез-газу встановлена шляхом різниці між вихідною вагою та конденсатом. Об'ємна витрата синтез-газу контролювалася за допомогою витратомірної шайби 32. Отриманий синтез-газ зберігається в балоні 1.

Кількість суміші, що сконденсувалася після охолодження в конденсаторі також визначається шляхом зважування за допомогою електронних вагів 30.

Кількість синтез-газу встановлена шляхом різниці між вихідною вагою та конденсатом. Об'ємна витрата синтез-газу контролювалася за допомогою витратомірної шайби 32. Отриманий синтез-газ зберігається в балоні 1.

Попередні результати дали змогу отримати графік залежності ступеня конверсії біоетанолу від температури в реакторі (рис.3) при різних значеннях тиску процесу конверсії.

Дослідження особливостей робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням, що працює на синтез-газі різного складу

Експериментальні дослідження робочого циклу ДВЗ з іскровим запалюванням, що працює на синтез-газі різного складу, були проведені на автомобільному двигуні з зовнішнім сумішоутворенням 4Ч 8,2/7,0, який входить до складу енергетичної експериментальної установки. Це чотиритактний

бензиновий двигун, паливну апаратуру якого переобладнано для роботи на зрідженому газі. Основні параметри двигуна наведені в таблиці. Принципова схема стенду наведена на рис. 2, фотографії на рис. 4.

Таблиця. Основні параметри двигуна з іскровим запалюванням 4Ч 8,2/7,0

№ п.п.	Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
1	Кількість циліндрів	шт.	4
2	Робочий об'єм циліндрів	см ³	1480
3	Діаметр циліндра	мм	82
4	Хід поршня	мм	70
5	Ступінь стиснення	–	8,8
6	Частота обертання колінчастого вала	хв ⁻¹	5800
7	Ефективна потужність (при 5800 хв ⁻¹)	кВт	55
8	Питома ефективна витрата палива	кг/(кВт·год)	0,298

З балонів 1, розташованих в окремому приміщенні, синтез-газ поступає в загальний ресивер 2, а потім через редуктор 4 до двигуна 5. Витрата синтезгазу визначається за перепадом тиску на манометрі 3. В системі живлення двигуна розташовані шість балонів з різним складом синтез-газу. Така система живлення дає змогу, відкриваючи по черзі

балони, отримати індикаторні діаграми та основні параметри робочого циклу двигуна при різних складах синтез-газу.

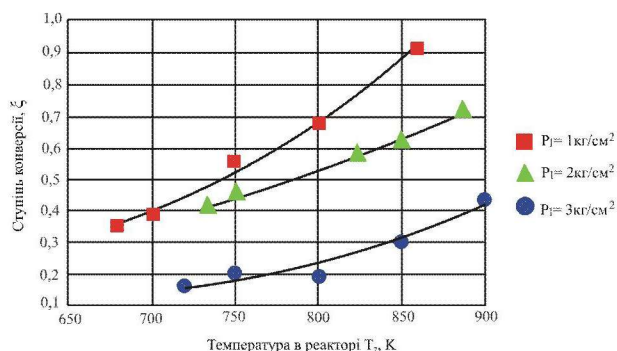
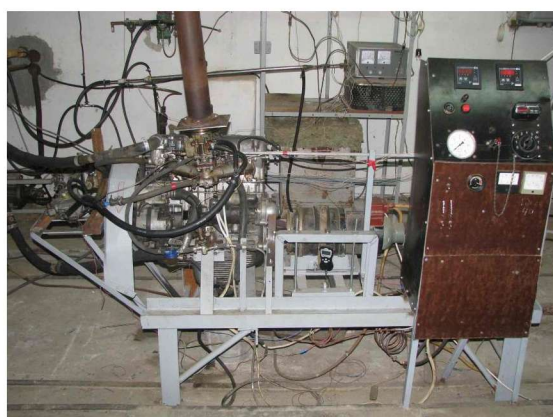


Рис. 3. Ступінь конверсії біоетанолу, отриманого експериментально



а



б

Рис. 4. Експериментальна установка на базі двигуна з іскровим запаленням 4Ч 8,2/7,0

Двигун 4Ч 8,2/7,0 навантажений електрогенератором постійного струму (ГС-24А) 6, отримана електрична енергія йде на блок ТЕНів 9. Потужність навантаження генератора встановлюється регулятором 7. Значення струму та напруги фіксуються на панелі приладів 14 амперметром 12 та вольтметром 11. Також на панелі 14 встановлені

наступні вимірювальні прилади: тахометр 17 для визначення обертів колінчастого валу двигуна; манометр тиску мастила 15; прилади для заміру температури відпрацьованих газів по циліндрам, мастила та охолоджуючої рідини 16. Після двигуна відпрацьовані гази через глушник 22 уходять в навколишнє середовище.

Потужність двигуна визначалась згідно формули (1):

$$N_e = M_{кр} \cdot \omega . \quad (1)$$

Замір крутного моменту двигуна $M_{кр}$ зводиться до вимірювання реактивної сили Р тензометричним датчиком 10.

Для визначення витрати повітря через двигун на всмоктуванні встановлено витратомірну шайбу 18 з диференційним перетворювачем тиску 19 для фіксації перепаду тиску.

Запис індикаторної діаграми здійснено за допомогою допрацьованої свічки запалювання другого циліндра. Для того щоб зберегти ступінь стиснення у цьому циліндрі, чутливий елемент датчика 20 був максимально наближений до камери згоряння. Фотографія свічки запалювання з доробками наведена на рис. 5. Результати замірів індикаторного тиску передавались та оброблялись на ПК 21.



а



б

Рис. 5. Свічка запалювання з датчиком тиску OPTRAND

В умовах експериментального стенду встановлено, що температурно-енергетичний потенціал відпрацьованих газів на виході з двигуна достатній для ефективно організації процесу парової конверсії біоетанолу. Температура відпрацьованих газів знаходиться у межах 380...500 °С (рис.6). Експе-

риментальні індикаторні діаграми, робочого процесу ДВЗ на пропані, бензині та синтез-газі при частоті обертання колінчатого валу 1800 хв^{-1} , представлена на рис. 7. При роботі двигуна на синтез-газі у порівнянні з бензином та пропаном, в умовах однакової частоти обертання колінчатого валу, спостерігались більш високі значення максимального тиску згоряння P_z – приріст складає $0,2 \dots 0,35 \text{ МПа}$, що пояснюється наявністю значної кількості водню у синтез-газі [9].

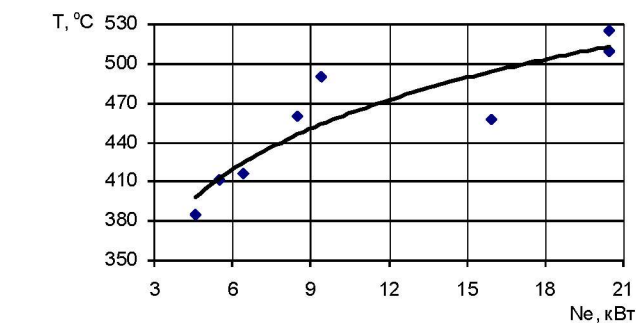
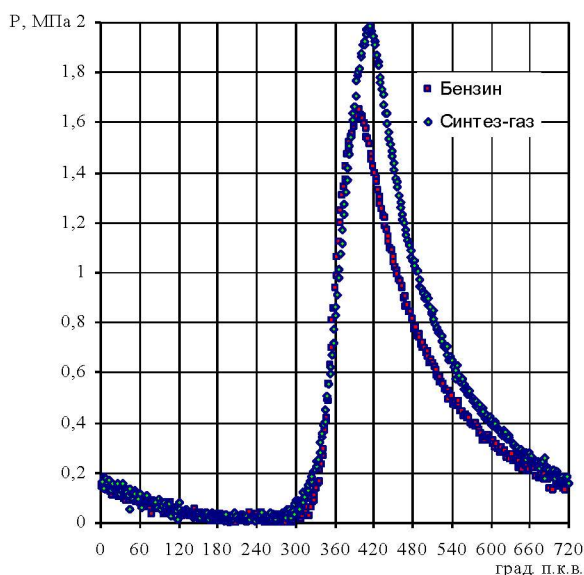


Рис. 6 Температура відпрацьованих газів в залежності від потужності двигуна

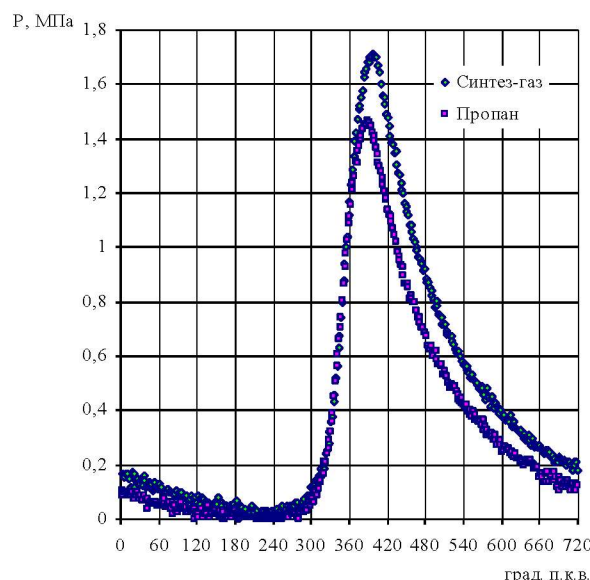


Рис. 7. Експериментальні індикаторні діаграми двигуна 4Ч 8,2/7,0

Висновки

1. В умовах експериментального стенду визначена ступінь конверсії біоетанолу, яка склала $36 \dots 65\%$ при 673 К і тиску $0,1 \text{ МПа}$.

2. При використанні отриманого синтез-газу у двигуні, спостерігалось стабільне без детонаційне згоряння, з незначним підвищенням максимального тиску при потужності $5,5 \text{ кВт}$ та частоті обертання колінчатого валу 1800 хв^{-1} .

Список літератури:

1. Третьяков В. Ф. Биэтанол – стратегия развития топливного и нефтехимического комплекса/ В. Ф. Третьяков / В. Ф. Третьяков // Химическая техника. – 2008. – № 1. – С. 8–12. 2. Данилов, А. М. Альтернативные топлива: достоинства и недостатки. Проблемы применения / А. М. Данилов, Э. Ф. Каминский, В. А. Хавкин // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И.Менделеева). – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 4–11. 3. Носач В.Г. Энергия топлива / В.Г. Носач– К.: Наук. думка, 1989. – 148 с. 4. Каменев В.Ф. Теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя на дизельно–водородных топливных композициях / В.Ф. Каменев,

В.М. Фомин, Н.А. Хрипач // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – №7(27) – С. 32 – 42. 5. Носач В.Г. Повышение эффективности использования природного газа в теплоэнергетике с помощью термохимической регенерации / В.Г. Носач, А.А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т.31, №3 – С. 42–50. 6. Носач В.Г. Повышение эффективности использования биогаза в теплоэнергетических установках с помощью термохимической регенерации / В.Г. Носач, А.А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т.31, №2 – С. 57–63. 7. Справочник по химии: Учебное пособие/ Л.М. Блинов, И.Л. Перфилова, Л.В. Юмашева, Р.Г. Чувильев. М.: Проспект, 2011. – 160 с. 8. Moller M. Ethanol steam reforming over $\text{Mg}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}_2\text{O}_3$ spinel oxide-supported Rh catalysts/ M. Moller, N. Amadeo // Journal of Catalysis. – 2005. – № 233. – P. 464– 477. 9. Shudo T. Combustion characteristics of $\text{H}_2\text{-CO-CO}_2$ mixture in an IC engine [Text] / T. Shudo, K. Tsuga, Y. Nakajima // SAE Technical Paper Series. – 2001. – 5–8 March. – P. 105–115.

Bibliography (transliterated):

1. Tret'jakov, V. F. Biojetanol – strategija razvitija toplivnogo i neftehimicheskogo kompleksa/ V. F. Tret'jakov // Himicheskaja tehnika. – 2008. – № 1. – S. 8–12. 2. Danilov, A. M. Al'ternativnye topliva: dosto-instva i nedostatki. Problemy primenenija / A. M. Danilov, Je. F. Kaminskij, V. A. Havkin // Ros. him. zh. (Zh. Ros.

him. ob-va im. D.I Mendeleeva). – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 4–11. 3. Nosach V.G. Jenergija topliva. – K.: Nauk. dumka, 1989. – 148 s. 4. Kamenev V.F. Teoreticheskie i jeksperimental'nye issledovanija raboty dvigatelja na dizel'no-vodorodnyh toplivnyh kompozicijah // V.F. Kame-nev, V.M. Fomin, N.A. Hripach // *Alternativnaja jenergetika i jekologija*. – 2005. – №7(27) – С. 32 – 42. 5. Nosach V.G. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zo-vanija prirodnogo gaza v teplojenergetike s s pomo-w'ju termohimicheskoj regeneracii // V.G. Nosach, A.A. Shrajber // *Promyshlennaja teplotehnika*. – 2009. – Т.31, №3 – С. 42–50. 6. Nosach V.G., Shrajber A.A. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija biogaza v teplojenergeticheskix ustanovkah s po-

mow'ju termohimicheskoj regenera-cii // *Promyshlennaja teplotehnika*. – 2009. – Т.31, №2 – С. 57–63. 7. *Spravochnik po himii: Uchebnoe posobie*/ L.M. Blinov, I.L. Perfilova, L.V. Jumasheva, R.G.Chuviljaev. M.: Prospekt, 2011. – 160 s. 8. Moller M. Ethanol steam reforming over Mg_xNi_{1-x}Al₂O₃ spinel oxide-supported Rh catalysts//M. Moller, N. Amadeo // *Journal of Catalysis*. – 2005. – № 233. – P. 464– 477. 9. Shudo T. Combustion characteristics of H₂-CO-CO₂ mixture in an IC engine [Text] //T. Shudo, K. Tsuga, Y. Nakajima // *SAE Technical Paper Series*. – 2001. – 5–8 March. – P. 105–115.

УДК 621.436.038

Ф.И. Абрамчук, д-р техн. наук, А.Н. Кабанов, канд. техн. наук, А.П. Кузьменко, инж., М.С. Липинский, асп.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ МАЛОЛИТРАЖНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Введение

Решение задачи многопараметровой оптимизации показателей процесса сгорания двигателя внутреннего сгорания (ДВС) во всем диапазоне режимов работы в настоящее время является актуальной проблемой. Если приблизительно до 70-х годов XX века параметры процесса сгорания двигателя на каждом режиме обычно настраивались только на максимальные показатели мощности, то начиная с 70-х годов XX века начала использоваться двухпараметровая оптимизация – выполнялся поиск компромисса между мощностью и экономичностью. Однако и в этом случае задача частично упрощалась – режимы максимальной мощности настраивались на максимальную мощность, частичные режимы – на максимальную экономичность.

В настоящее время в ряд самых важных показателей наряду с мощностью и экономичностью стала экологичность. Однако требования по экологичности зачастую идут вразрез с требованиями по двум первым показателям: так, снижение выбросов NO_x требует снижения температуры сгорания, что, в свою очередь, приводит к снижению мощности и термического КПД двигателя.

В связи с этим возникает задача оптимизации каждого режима минимум по трем показателям (критериям): мощность, экономичность, токсичность.

Анализ литературных источников

При исследовании ДВС применяется полно-факторный эксперимент со всеми возможными

комбинациями факторов и последующим перебором полученных результатов [1-3]. Однако такой метод неэффективен: он является очень громоздким, требует больших затрат времени и ресурсов как на исследования, так и на обработку результатов этих исследований.

Шагом в направлении сокращения количества исследований и оптимизации их результатов стало использование математического планирования эксперимента (МПЭ) [1-3]. Этот метод позволяет сократить количество экспериментов, а поиск наилучшего значения функции отклика проводится за счет анализа этой функции на экстремумы. Однако вопрос согласования значений нескольких функций в одной точке (для одной комбинации факторов) все равно остается нерешенным.

В настоящее время наиболее эффективно эта задача решается с помощью метода исследования пространства параметров с использованием сеток Соболя [4]. Данный метод позволяет не только сократить количество экспериментов, но и выбрать оптимальное сочетание нескольких функций отклика для каждой точки. Впервые в двигателестроении данный метод был применен при разработке топливной аппаратуры для быстроходного дизеля [5, 6].

Цель исследования

Целью исследования является адаптация метода исследования пространства параметров с использованием сеток Соболя для оптимизации параметров процесса сгорания малолитражного газового двигателя.