

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 // Al'ternativnaja jenergetika i jekologija. – 2005. – №7(27) – С. 32 – 42. 5. Nosach V.G. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zo-vanija prirodnogo gaza v teplojen-ergetike 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 применён 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.

Метод исследования пространства параметров с использованием сеток Соболя

Отличительная черта метода – систематический просмотр многомерных областей: в качестве пробных точек в пространстве параметров используются точки равномерно распределенных последовательностей. Для этих целей были применены так называемые ЛП_r-последовательности, которые обладают наилучшими характеристиками равномерности среди всех известных в настоящее время равномерно распределенных последовательностей.

Кроме того, отличием сеток Соболя от других методов является то, что при проекции многомерной сетки на любую грань многомерного куба точки не накладываются одна на другую, то есть не теряется информация.

Реализация алгоритма исследования пространства параметров с использованием сеток Соболя выглядит следующим образом.

Предположим, что область поиска имеет вид единичного n -мерного куба. Внутри этого куба размещается 2^l (l – натуральное число) точек. Координата каждой из этих точек с номером i с размерностью j ($j \leq n$)

$$q_{i,j} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \cdot \left\{ 0,5 \cdot \sum_{l=k}^m \left[2^{\left\{ i 2^{-l} \right\}} \right] \times \dots \right. \\ \left. \dots \times \left[2^{\left\{ r_{jl} 2^{k-1-l} \right\}} \right] \right\}, \quad (1)$$

где m – граница суммы

$$m = 1 + \lceil \ln i / \ln 2 \rceil; \quad (2)$$

i – номер расчетной точки; j – номер размерности; r_{jl} – значение числителя по таблице (j – номер по вертикали, l – номер по горизонтали); $\{z\}$ – целая часть числа z ; $\{z\}$ – дробная часть числа z .

Значения числителей r_{jl} приведены в виде таблицы в работе [4]. После расчета $q_{i,j}$ рассчитываются нормированные значения факторов X_1, X_2, \dots, X_j . Каждому из факторов отвечает одно из значений размерности j массива величин $q_{i,j}$.

На рис. 1 и 2 представлены примеры соответственно двухмерной и трехмерной сеток Соболя.

Практика показала, что для обеспечения точности работы метода достаточно 512 расчётных или испытательных режимов [4].

Результирующие величины, являющиеся функциями факторов X_1, X_2, \dots, X_j , как определяющие качество объекта или предмета исследования

называются критериями качества. В данной работе в качестве критериев качества принимаются показатели мощности, экономичности и токсичности.

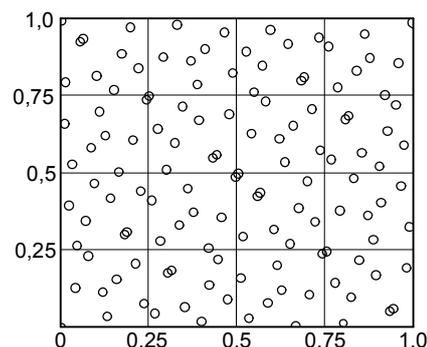


Рис. 1. Двухмерная сетка Соболя

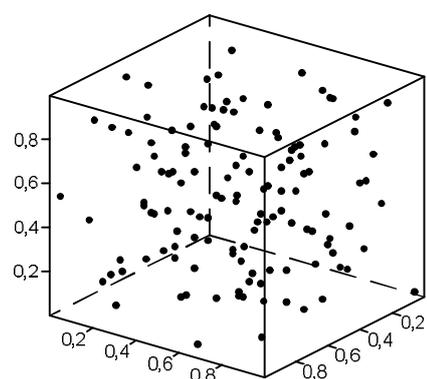


Рис. 2. Трёхмерная сетка Соболя

Использование метода при составлении характеристических карт

При составлении характеристических карт, то есть набора регулировочных параметров для всего поля режимов работы двигателя, используются исходные данные, приведенные в таблице 1.

Выбор диапазона варьирования приведенных исходных данных происходил из следующих соображений.

Таблица 1. Варьируемые параметры двигателя и диапазон их изменения

α	θ	n	\bar{P}_e
–	град. пкв до ВМТ	мин ⁻¹	–
1	5	800	0
1,5	70	5600	1,0

При $\alpha < 1$ топливо сгорает не полностью и, как следствие, сильно увеличиваются выбросы CO и CH. При $\alpha > 1,5$ существенным образом уменьшается содержимое NO_x в отработанных газах, однако при отсутствии добавок водорода из-за резкого увеличения цикловой нестабильности рабочего процесса и увеличения частоты пропусков вспышек существенным образом снижаются показатели мощности и экономичности газового ДВС, а также резко увеличиваются выбросы CH.

Пределы изменения угла опережения зажигания θ , град. п.к.в. до ВМТ, выбирались на основании экспериментальных данных, полученных в результате предварительных испытаний газового двигателя 4ГЧ7,5/7,35.

Диапазон изменения частоты вращения коленчатого вала n , мин^{-1} , выбирался исходя из соображений обеспечения стабильной работы двигателя при любой комбинации других факторов.

Относительная нагрузка на двигатель \bar{P}_e изменялась от минимальной ($\bar{P}_e = 0$) до максимальной ($\bar{P}_e = 1,0$).

Исходные данные для выполнения исследования пространства параметров с использованием сеток Соболя с факторами, представленными в натуральном виде, приведены в таблице 1.

Расчетно-экспериментальное исследование газового двигателя 4ГЧ7,5/7,35

Исходными данными для выполнения исследования пространства параметров с использованием сеток Соболя с целью выбора оптимальных параметров процесса сгорания газового двигателя 4ГЧ7,5/7,35 являются результаты расчетно-экспериментального исследования в виде 512 расчетных режимов. Расчет процесса сгорания выполнялся по методике Вибе [8], десять расчетных режимов проверялись экспериментальным путем при помощи стенда, описанного в [9]. Погрешность определения N_e и g_e составила не более 5 %, погрешность определения содержания NO_x в отработавших газах – не более 10 %.

Построение огибающих кривых

В качестве критерия токсичности были выбраны удельные выбросы оксидов азота NO_x , $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. Это обусловлено тем, что среди нормируемых вредных веществ, содержащихся в отработавших газах газового двигателя (CO, CH, NO_x), это вещество является наиболее токсичным. Например, если взять условную токсичность CO за

единицу, то для CH эта величина будет составлять 2, а для NO_x – 50 [7]. То есть, при выборе оптимальных регулировочных параметров целесообразно только проверить режимы с выбранными параметрами на выбросы CH и CO и, если выбросы превышают допустимые нормы – провести дополнительное исследование.

Критериями экономичности и мощности, очевидно, следует выбрать эффективные показатели – удельный эффективный расход топлива g_e , $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, и эффективную мощность N_e , кВт.

Результаты расчетного определения критериев качества приведены на рис. 3 в виде трехмерного куба. Координатами каждой из 512 точек являются значения NO_x , $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, g_e , $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ и N_e , кВт.

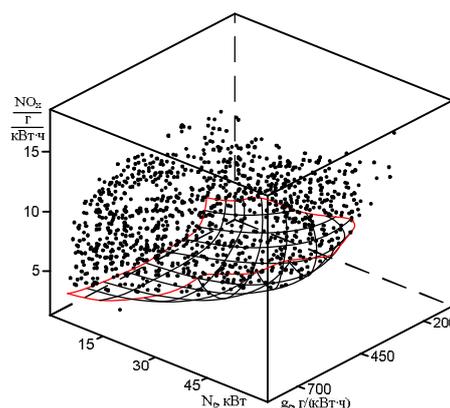


Рис. 3. Результаты определения критериев качества

Точки, соответствующие режимам, обеспечивающим оптимальное сочетание критериев качества, в двухмерном случае (два критерия качества) располагаются на огибающей кривой [4]. Данная кривая называется компромиссной, так как улучшая один критерий качества, мы ухудшаем другой. Эти точки также называются паретовскими. Двигаясь по компромиссной кривой, специалист принимает решение, выбирая одну (или несколько) точек из множества паретовских точек.

В данном исследовании используются три критерия качества, то есть данный случай является трехмерным. Соответственно, огибающая кривая превращается в огибающую поверхность (рис. 3).

В соответствии со спецификой исследования, необходимо найти не одну отдельную точку с оптимальными значениями критериев качества, а поле точек с различными сочетаниями \bar{P}_e - n , обеспечивающими противоречивые требования: макси-

мальную эффективную мощность N_e при минимальных значениях g_e и NO_x во всем диапазоне этого поля. Соответственно, для каждой из этих точек необходимо выбрать оптимальное сочетание этих критериев качества.

Общая схема алгоритма выбора точек, соответствующих поставленным условиям, выглядит следующим образом. Трехмерное пространство $NO_x-N_e-g_e$ разбивается на элементарные объемы-параллелепипеды со сторонами основания ΔN_e , Δg_e и высотой NO_x . В данный элементарный объем попадает множество точек, из которых выбирается одна, удовлетворяющая условию $NO_x = \min$. Выбранные таким образом точки всех элементарных объемов будут составлять множество паретовских точек, анализируемых с целью построения характеристических карт.

Алгоритм выбора паретовских точек для реализации при помощи вычислительной техники приведен на рис. 4. В качестве исходных данных задаются длины ребер куба N_{emax} , g_{emax} , NO_{xmax} ; шаги поиска в двумерном пространстве ΔN_e и Δg_e , численно равные длинам ребер оснований элементарных параллелепипедов; количество точек в пространстве поиска m_{max} . Начальные точки реализации алгоритма поиска обозначим как N_{e0} и g_{e0} . Зададим максимальное количество точек, являющихся вершинами оснований элементарных параллелепипедов

$$i_{max} = \frac{N_{emax}}{\Delta N_e}, \quad (3)$$

$$j_{max} = \frac{g_{emax}}{\Delta g_e}. \quad (4)$$

Рассчитаем кол-во элементарных параллелепипедов

$$P_{par\ max} = (i_{max} - 1) \cdot (j_{max} - 1). \quad (5)$$

Рассчитаем координаты вершин параллелепипеда P_{pari}

$$N_{e_{i+1}} = N_{e_i} + \Delta N_e, \quad (6)$$

$$g_{e_{j+1}} = g_{e_j} + \Delta g_e. \quad (7)$$

Из массива точек P_m выбираются точки, координаты которых соответствуют условиям

$$N_{e_{i+1}} > N_{em} \geq N_{e_i}, \quad (8)$$

$$g_{e_{j+1}} > g_{em} \geq g_{e_j}, \quad (9)$$

где m – номер точки.

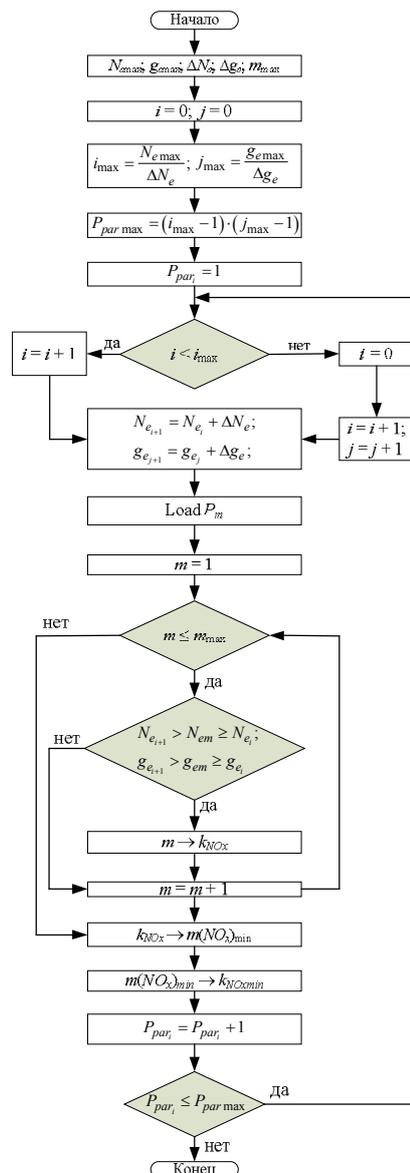


Рис. 4. Алгоритм выбора паретовских точек

Получаем массив точек k_{NO_x} , из этого массива выбирается одна точка, удовлетворяющая условию $NO_x = \min$. Номер этой точки m заносится в массив $k_{NO_x\ min}$.

Точки из массива $k_{NO_x\ min}$ затем выбираются для построения характеристических карт специалистом.

Точки из выбранного вектора раскладываются на массивы α и θ , затем полученные массивы помещаются в координатные оси $\bar{P}_e - n$. Полученные графики называются характеристическими картами и являются исходными данными для программирования электронного блока управления двигателем. В случае необходимости эти характеристические карты корректируются по результатам дополни-

тельных испытаний либо исходя из других соображений.

Характеристические карты

Так как на двигателе 4Ч7,5/7,35 применяется смешанное регулирование мощности, то наряду с характеристическими картами угла опережения зажигания и коэффициента избытка воздуха в системе управления двигателем также используется

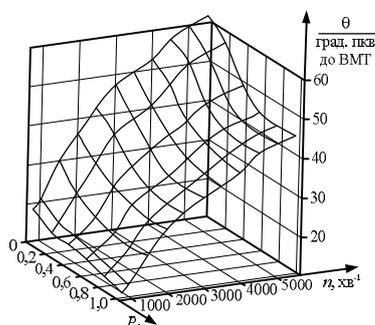


Рис. 5. Характеристическая карта управления углом опережения зажигания

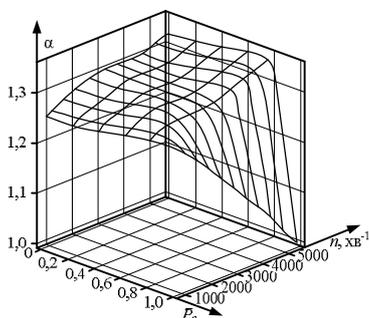


Рис. 6. Характеристическая карта управления коэффициентом избытка воздуха

Выводы

1. Показано, что решение задачи оптимизации параметров процесса сгорания малолитражного газового двигателя наиболее эффективно осуществляется при помощи методики исследования пространства параметров с использованием сеток Соболя.

2. Осуществлен выбор варьируемых параметров и диапазона их варьирования, а также критериев качества для максимально полного описания параметров работы двигателя на конкретном режиме.

3. Уточнён алгоритм выбора паретовских точек для трехмерного пространства.

4. Получено поле оптимальных значений параметров процесса сгорания и характеристические карты малолитражного газового двигателя

характеристическая карта угла открытия дроссельной заслонки. Сами характеристические карты при этом строятся как функции вышеупомянутых величин от частоты вращения коленчатого вала n , мин^{-1} , и относительной нагрузки \bar{P}_e .

Полученные в результате выполненного исследования характеристические карты для газового двигателя 4Ч7,5/7,35 приведены на рис. 5, 6 и 7.

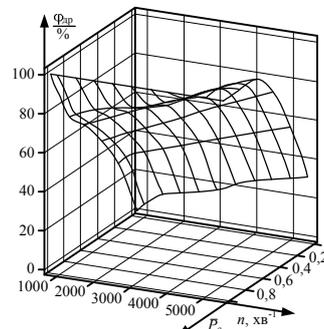


Рис. 7. Характеристическая карта угла открытия дроссельной заслонки

4Ч7,5/7,35 с высокоэнергетической системой зажигания.

Список литературы:

1. Шокотов Н.К. Результаты оптимизации параметров цикла тепловозной дизель-турбинной установки / Н.К. Шокотов, А.И. Губин, В.И. Мороз, В.С. Клепанда // Двигатели внутреннего сгорания: республиканский межведомственный науч.-техн. сб. – Харьков: Вища школа. – 1980. – № 32. – С. 11-14.
2. Мороз В.И. Математическое планирование исследования при оптимизации показателей турбопоршневого дизеля / В.И. Мороз // Двигатели внутреннего сгорания: республиканский межведомственный науч.-техн. сб. – Харьков: Вища школа. – 1976. – № 24. – С. 96-102.
3. Шокотов Н.К. Основы термодинамической оптимизации транспортных дизелей / Шокотов Н.К. – Х.: Вища шк., 1980. – 120 с.
4. Соболев И.М. Выбор оптимальных критериев в задачах со многими параметрами / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 2005. – 110 с.
5. Врублевский А.Н. Метод многокритериальной идентификации математической модели топливной системы / А.Н. Врублевский // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Харьк. нац. авт.-дор. ун-та. – Вып. 23. – Харьков, 2008. – С.95-99.
6. Врублевский А.Н. Научные основы создания аккумуляторной топливной системы для быстроходного дизеля / Врублевский А.Н. – Х.: ХНАДУ, 2010. – 216 с.
7. Каніло П.М., Бей І.С., Ровенський О.І. – Х.: Прапор, 2000. – 304 с.
8. Вибє І.І. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибє. – М.: Машгиз, 1962. – 270 с.
9. Туренко А.Н. Автоматизированный стенд для исследования и доводки газового малолитражного быстроходного двигателя внутреннего сгорания / А.Н. Туренко, Ф.И. Абрамчук, А.Н. Пойда, А.Н. Кабанов, А.А. Дзюбенко, А.П. Кузьменко, Г.В. Майстренко // Механика и машиностроение: сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 1. – С. 66-73.

Bibliography (transliterated):

1. Shokotov N.K. Rezul'taty optimizatsii parametrov zikla teplovoznogo dizel'-turbinnoy ustanovki / N.K. Shokotov, A.I. Gubin, V.I. Moroz, V.S. Klepanda // Dvigateli vnutrennego sgoraniya: respublikanskiy mejvedomstvennyy nauch.-tehn. sb. – Har'kov: Vicha shkola. – 1980. – № 32. – S. 11-14. 2. Moroz V.I. Matematicheskoe planirovanie issledovaniya pri optimizatsii pokazateley turboporshnevoego dizelya / V.I. Moroz // Dvigateli vnutrennego sgoraniya: respublikanskiy mejvedomstvennyy nauch.-tehn. sb. – Har'kov: Vicha shkola. – 1976. – № 24. – S. 96-102. 3. Shokotov N.K. Osnovy termodinamicheskoy optimizatsii transportnykh dizelei / Shokotov N.K. – H.: Vicha shk., 1980. – 120 s. 4. Sobol' I.M. Vybor optimal'nykh kriteriev v zadachah so mnogimi parametrami / I.M. Sobol', R.B. Statni-kov. – M.: Nauka, 2005. – 110 s. 5. Vrublevskiy A.N. Metod mnogokriterial'noy

identifikatsii matematicheskoy modeli toplivnoy sistemy / A.N. Vrublevskiy // Avtomobil'nyy transport: sb. nauch. tr. Har'k. naz. avt.-dor. un-ta. – Vyp. 23. – Har'kov, 2008. – S.95-99. 6. Vrublevskiy A.N. Nauchnye osnovy sozdaniya akkumulyatornoy toplivnoy sistemy dlya bystrohodnogo dizelya / Vrublevskiy A.N. – H.: HNADU, 2010. – 216 s. 7. Kanilo P.M. Avtomobil' ta navkolishne seredoviche / Kanilo P.M., Bey I.S., Rovens'kiy O.I. – H.: Prapor, 2000. – 304 s. 8. Vibe I.I. Novoe o rabochem zikle dvigateley / I.I. Vibe. – M.: Mashgiz, 1962. – 270 s. 9. Turenko A.N. Avtomatizirovannyi stend dlya issledovaniya i dovodki gazovogo malolitrajnogo bystrohodnogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya / A.N. Turenko, F.I. Abramchuk, A.N. Poyda, A.N. Kabanov, A.A. Dzyubenko, A.P. Kuz'menko, G.V. Maystrenko // Mehanika i mashinostroenie: sb. nauch. tr. – Har'kov: NTU «HPI». – 2010. – № 1. – S. 66-73.

УДК 621.43.003

С.А. Ерощенко, д-р техн. наук, В.А. Корогодский, канд. техн. наук, А.А. Хандримайлов, канд. техн. наук, О.В. Василенко, инж.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ В ДВУХТАКТНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ

Введение и постановка проблемы

Двухтактные ДВС с искровым зажиганием (ИЗ) и кривошипно-камерной продувкой являются весьма распространенным типом двигателей. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с четырехтактными ДВС, таких как меньшая стоимость производства в связи с отсутствием клапанов газораспределения, большая удельная мощность и меньшие массо-габаритные показатели. Двухтактные ДВС с ИЗ и внешним смесеобразованием (карбюратор) имеют высокий расход топлива и значительные выбросы вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ). Снижение расхода топлива и уменьшение выбросов ВВ с ОГ возможно получить путем перехода от внешнего смесеобразования к внутреннему, используя непосредственное впрыскивание топлива (НВТ).

Для снижения расхода топлива и уменьшения выбросов ВВ с ОГ необходимо совершенствовать процессы газообмена. Совершенство процессов газообмена определяется следующими интегральными показателями: коэффициент утечки (ν), коэффициент наполнения (η_{vs}), коэффициент избытка продувочного воздуха (ϕ_k) и коэффициент остаточных газов (γ).

Одним из определяющих факторов, характеризующих качество и совершенство протекания процессов газообмена в двухтактных ДВС, является коэффициент остаточных газов (γ).

Анализ публикаций

Определение γ возможно путём проведения экспериментальных исследований или путем мате-

матического моделирования. Математическое моделирование предпочтительнее, так как позволяет получить достоверные результаты с меньшими затратами.

В настоящее время исследователями используются программные комплексы, которые позволяют моделировать газодинамические потоки в полостях ДВС. В работе [1] авторы использовали программный комплекс SOLIDWORKS с модулем COSMOS FLOWORKS, позволяющий моделировать газодинамические процессы. В результате исследований авторы получили значения параметров и скоростей газа в трехмерной модели камеры сгорания двигателя. В работе [2] использовалась специальная программа KIVA-II, позволяющая также проводить трехмерное моделирование газовых потоков в камере сгорания двухтактного двигателя. Авторами были получены значения концентраций газов по объему цилиндра при изменении угла поворота коленчатого вала.

Целью исследований являлось определение коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с ИЗ, системами внешнего смесеобразования (карбюратор) и внутреннего смесеобразования (НВТ). Значения γ определялись с учетом теплофизических свойств рабочего тела.

Использование трехмерного моделирования газовых течений в полостях двигателя позволяет совершенствовать качество протекания процессов газообмена и предопределяет повышение эффективных показателей ДВС.