

ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.863.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ В МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ

**А.Н. Врублевский, проф., д.т.н., Е.С. Грайворонский, асп.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

Аннотация. Приведены результаты оптимального проектирования камеры сгорания высокооборотного автомобильного дизеля, основанного на применении метода исследования пространства параметров. По трем критериям качества определена оптимальная форма камеры сгорания и направление топливных струй при заданной степени сжатия и других функциональных ограничениях.

Ключевые слова: дизель, камера сгорания, оптимизация, критерии качества.

РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ДИЗЕЛЯ У БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНІЙ ПОСТАНОВЦІ ЗАДАЧІ

**О.М. Врублевський, проф., д.т.н., Є.С. Грайворонський, асп.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Анотація. Надано результати оптимального проектування камери згоряння високооборотного автомобільного дизеля, що базується на використанні методу дослідження простоту параметрів. За трьома критеріями якості визначено оптимальну форму камери згоряння і напрямки паливних струменів за заданого ступеня стиску та інших функціональних обмежень.

Ключові слова: дизель, камера згоряння, оптимізація, критерії якості.

RESULTS OF THE DIESEL COMBUSTION CHAMBER OPTIMIZED DESIGN IN THE MULTICRITERIAL TASK ENVIRONMENT

**A. Wrublewski, Prof., D. Sc. (Eng.), Ye. Hraivoronskyi, P. G.,
Kharkov National Automobile and Highway University**

Abstract. The results of optimized designing of the high-speed vehicle diesel engine combustion chamber based on application of the method of parameters space investigation are given. The optimal form of the combustion chamber and the direction of fuel jets at adjusted pressure rate and other functional restrictions are determined according to three criteria of quality – fuel consumption, hard particles and nitric oxide emissions.

Key words: vehicle diesel engine, optimization, sobol networks, CFD modeling, combustion chamber.

Введение

Одно из главных направлений совершенствования двигателей связано с минимизацией концентрации вредных веществ в отработанных газах при обеспечении требуемых мощности, характеристик двигателя, а также

сохранения (улучшения) топливной экономичности. В связи с кардинальным различием факторов, влияющих на количество NO_x и сажи в отработанных газах, одновременное снижение количества выбросов одного и второго компонентов является трудно решаемой задачей. Проблема состоит в том, что

обычные методы снижения одного из вредных выбросов приводят к увеличению выброса второго. Оптимизация параметров, определяющих процессы ДВС, является предпочтительной путем достижения цели, поскольку данный подход минимизирует количество необходимых изменений в конструкции всех систем.

Анализ публикаций

В работе [1] представлены результаты создания модели камеры сгорания с помощью программного комплекса AVL FIRE для решения оптимизационных задач. В итоге создана и протестирована параметрическая модель камеры сгорания двигателя 4ДТНА-2. Моделирование процессов смесеобразования, впрыскивания и сгорания с использованием исходной формы камеры сгорания показало адекватность результатов экспериментальным данным, полученным в ГП «ХКБД» при стендовых испытаниях одноцилиндрового дизеля.

Влияние геометрии камеры сгорания на показатели ДВС, в т.ч. по вредным выбросам, является предметом многих исследований [1–3]. Известно, что при удачно спроектированной форме КС возможно достичь неплохих результатов в снижении количества вредных выбросов, при неизменных эффективных показателях. Зависимость показателей работы двигателя от формы КС весьма сложна, поскольку форма непосредственно влияет на воздушный поток и его взаимодействие со струями впрыскиваемого топлива. Литературные источники подтверждают, что определение оптимальной формы КС – сложная задача, так как она зависит от множества параметров двигателя и системы впрыскивания. Следовательно, такую задачу весьма проблематично решить при однокритериальной постановке.

В работе [2] описан пример оптимизации взаимодействия параметров КС и характеристик системы топливоподачи. В работе [3] проведено экспериментальное и расчетное исследование влияния геометрии КС и частоты вращения коленчатого вала (КВ) на уровень вредных выбросов. Было обнаружено, что влияние геометрии КС на показатели ДВС более выражено на низких частотах вращения КВ. На высоких частотах плавные переходы поверхностей, составляющих КС,

приводят к снижению уровня сажи и повышению уровня NO_x . Наилучшие результаты получены при распыливании топлива в направлении днища камеры сгорания.

Поскольку геометрия камеры сгорания и параметры топливного факела являются важными параметрами для улучшения показателей ДВС и снижения количества вредных выбросов, актуальным является комбинированное исследование их взаимодействия и влияния на уровень образования сажи и выбросов NO_x .

Цель и постановка задачи

Целью данной работы является снижение расхода топлива и выбросов вредных веществ автомобильного дизеля серии ДТ (ЧН8,8/8,2) путем выбора оптимальной формы камеры сгорания и ее согласования с топливными струями. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Определены оптимизируемые параметры и возможные пределы их изменения.
2. Выбраны функциональные ограничения и критерии качества.
3. Предложен метод и с его помощью проведен поиск оптимального решения.
4. Проведен анализ результатов оптимизации.

Объектом исследования являются процессы смесеобразования, сгорания и образования вредных веществ в высокооборотном дизеле ЧН 8,8/8,2. Предметом исследования являются характеристики процессов смесеобразования и сгорания.

Методика проведения оптимизации

В данной работе при решении оптимизационной задачи использован метод, предложенный И.М. Соболев и Р.Б. Статниковым [4]. В основе данного метода лежит численное исследование (сканирование) пространства параметров проектируемого объекта, которое проводится в три этапа. 1-й этап – составление таблиц испытаний. Последовательно выбирается N пробных точек, определяющих параметрическую модель камеры сгорания и параметры топливоподачи. В каждой из точек моделируются процессы смесеобразования, сгорания, образования оксидов азота и твердых частиц и вычисляются значения всех критериев качества. По

каждому критерию составляется таблица испытаний. Таблицы являются аналогом статистических вариационных рядов. 2-й этап – выбор критериальных ограничений. Этот этап выполняется в режиме диалога ЭВМ – человек (проектировщик). Просматривая каждую из таблиц, он должен назначить ограничение для каждого из критериев. 3-й этап – проверка непустоты множества допустимых точек. Этот этап выполняется автоматически.

Выбор пробных точек

Известно, что равномерное сканирование многомерного куба является оптимальным только в одномерном случае – при размерности пространства $n = 1$. С увеличением n способность такого подхода описывать изменения функции быстро ухудшается.

Подробная модель исследуемых процессов содержит в своем описании большое число параметров. Априори известно, что значительная часть этих параметров оказывает на изменение любого фиксированного критерия крайне слабое влияние, но «отсеять» эти параметры обычно не представляется возможным. В крайней ситуации, которая на самом деле встречается достаточно часто, сильно влияет только один параметр, а остальные для данного критерия являются уточняющими. Поэтому оптимальным может считаться такое распределение N пробных точек, у которого каждая из координат (параметров) представляет собой равномерно распределенную последовательность N точек на отрезке; кубическая решетка этому требованию не удовлетворяет. Частичное решение этой проблемы дает использование генераторов случайных чисел. В работе [4] предложено такое оптимальное распределение точек в пространстве «сетки Соболя», которое решает эту проблему самым эффективным образом. Оптимальная последовательность всегда содержит $N = 2^p$ точек, где p – целое положительное число. В работе [4] это распределение названо ЛП_τ-последовательностью.

Выбор оптимизируемых параметров КС

На рис. 1 представлен эскиз исследуемой формы камеры сгорания. В данном эскизе затемненные зоны отображают области, изменяющиеся при поиске оптимума. Черными линиями обозначены неизменные границы

формы либо границы оптимизируемых участков. Выбранный диапазон изменения параметров КС обеспечивает для всех вариантов постоянство степени сжатия. Таким образом, изменения формы КС связаны с центральной зоной и выходной кромкой камеры в поршне.

Для согласования формы КС и топливных струй при формировании исходных данных контролировалось значение угла β (рис. 1). По большому счету данный параметр следует отнести к функциональным ограничениям. Изменение угла β принято в пределах 120–130 градусов.

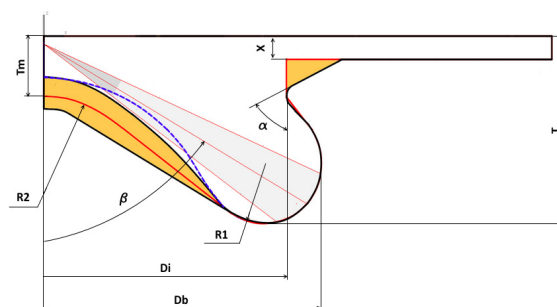


Рис. 1. Границы изменения профиля КС

Выбор допустимых пределов варьирования каждого из параметров проведен с учетом ограничений, связанных с компоновкой и технологией изготовления.

В пределах исследуемой области изменение каждого параметра табл. 1 составило $\pm (40-50) \%$. Это позволяет исследовать обширную область многомерного пространства и определить направление поиска оптимума. С помощью генератора ЛП_τ-последовательности были получены пробные точки и составлены таблицы испытаний. Для сканирования пространства параметров согласно описанному алгоритму выбраны пробные 32 точки.

Таблица 1 Параметры исходной модели камеры

№	Параметр	Размерность	Величина
1	X	мм	1,96
2	Tm	мм	3
3	T	мм	13,5
4	$R1$	мм	5
5	$R2$	мм	10
6	Di	мм	42
7	Db	мм	48
8	α	град	0
9	β	град	120

Определение функциональных ограничений

Экспериментальные данные, необходимые для оценки адекватности результатов моделирования, получены в ходе моторных испытаний исследовательского двигателя 1ДТНА [1] с исходными параметрами КС. Параметры двигателя и системы подачи топлива приведены в табл. 2. Расчеты произведены для режима частичной нагрузки при 3000 мин^{-1} .

Таблица 2 Параметры двигателя

Степень сжатия	18,5
Число сопловых отверстий форсунки	6
Диаметр соплового отверстия, мм	0,2
Угол опережения впрыскивания, °ПКВ	20
Продолжительность топливоподачи, °ПКВ	18
Цикловая подача, мг	40,2

В дополнение к определению параметрических ограничений при формировании исходных данных для решения задачи поиска оптимальных параметров КС необходимо включить функциональные ограничения.

Для камеры сгорания функциональными ограничениями являются такие параметры:

- степень сжатия постоянна для всех вариантов (табл. 2);
- индикаторная мощность одноцилиндрового двигателя – не ниже 13 кВт;
- длительность сгорания – не более 70 град. п.к.в.

При решении оптимизационной задачи функциональные ограничения можно использовать двумя способами. Первый способ – после проведения численного эксперимента исключить из рассмотрения точки, в которых приведенные условия не выполняются. Второй способ – на стадии формирования исходных данных учесть указанные ограничения. Очевидно, что второй способ необходимо использовать для задания требуемой степени сжатия.

Выбор критериев качества

Для камеры сгорания целесообразно задать два типа решающих критериев качества – расход топлива и количество вредных веществ в отработанных газах. Для получения множества паретовских точек, представляю-

щих собой одномерное многообразие на плоскости, удобно, чтобы все критерии стремились к минимуму.

Паретовским точкам в плоскости критериев (рис. 2) будет соответствовать поверхность (отрезок) компромиссной криволинейной поверхности (плоской кривой), являющейся огибающей для всех представленных там точек.

Результаты оптимизации

Расчет пробных точек показал (рис. 2, 3), что изменением формы КС в поршне возможно добиться снижения концентрации оксидов азота и сажи, а также улучшить топливную экономичность дизеля. Однако выбор вектора параметров каждой точки, находящейся на паретовской кривой, требует компромисса.

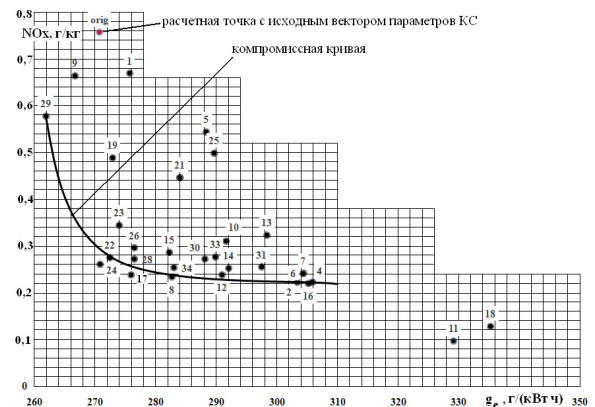


Рис. 2. Распределение пробных точек в плоскости критериев (NO_x , g_e)

По критериям « NO_x » и « g_e » результаты расчета показывают, что точки с вектором входных данных (рис. 2) 2, 8, 12, 16, 17, 22, 24, 29, 34 по одному или двум критериям позволяют снизить один из критериев. Так, параметры точки 29 положительно влияют на топливную экономичность и по выбросам NO_x обеспечивают несущественное улучшение. Для точек 17, 22, 24 при неизменном расходе воздуха достигается снижение выбросов NO_x в три раза. Отдельные точки 11 и 18 показывают снижение выбросов NO_x почти в семь раз, но по топливной экономичности являются неприемлемыми (g_e увеличивается с 270 до 330 г/(кВт·ч)).

Рассмотрение результатов расчета в плоскости критериев « NO_x » и «сажа» позволяет уточнить количество эффективных точек.

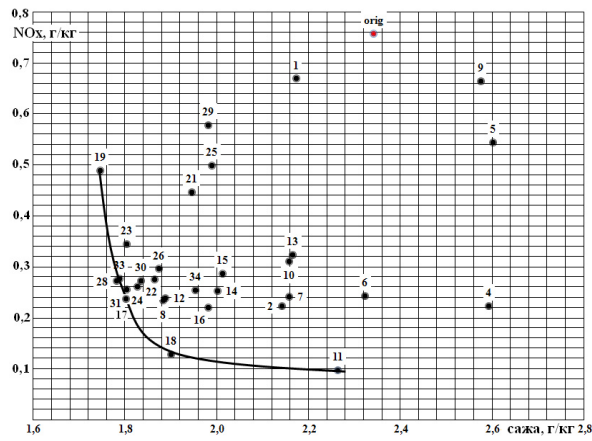


Рис. 3. Распределение пробных точек в плоскости критериев (NO_x, сажа)

На компромиссной кривой (рис. 3) находятся точки 19, 28, 33, 31, 24, 17, 18, 11, которые приближаются к эффективным – 22, 8, 30. В сравнении с базовой формой камеры сгорания, все указанные векторы параметров обеспечивают снижение выбросов NO_x и сажи. Но более существенно снижение относительной массы NO_x. Из перечисленных точек

только 17, 19, 22 и 24 являются эффективными по трем выбранным критериям качества.

Рассмотрим эти точки подробно. Для расчета вектора 17, в сравнении с базовой камерой, выбран угол фаски 1,86° (базовый 0°), увеличенный в два раза параметр *Tm* и радиус *R6* (рис. 1), увеличенный с 1 мм до 7,496 мм. Аналогичную форму КС обеспечивают векторы 22 и 24. Для всех эффективных точек параметры КС не являются граничными, что свидетельствует о корректности выбора исходных данных. Без сомнения, при снятии функционального ограничения «степень сжатия» оптимальные параметры КС изменятся. Очевидно, что в другом случае постановка задачи и методика выбора исходных точек потребует корректировки.

Сравнительный анализ характера формирования и направления движения рабочего тела в период 710–760 град. п.к.в. показывает, что при исходной форме КС ниже скорость движения свежего заряда на периферию (табл. 3).

Таблица 3 Сравнение полей параметров в продольном сечении камеры сгорания

Исходная точка	Пробная точка № 17	
		Скорость
		Скорость распространения пламени
		Температура

При выполнении фаски (например, вектор 17) процесс распределения свежего заряда по объему интенсифицируется, что приводит к снижению температуры в локальных зонах. Условия для образования NO_x становятся менее благоприятными.

Выводы

Для поиска оптимального решения использован метод исследования пространства параметров, предложенный И.М. Соболев и Р.Б. Статниковым.

Определены три оптимизируемых параметра камеры сгорания высокооборотного дизеля и возможные пределы их изменения. Изменения формы КС связаны с центральной зоной и выходной кромкой камеры в поршне.

При оптимизации функциональными ограничениями приняты следующие параметры:

- степень сжатия постоянна для всех вариантов и обеспечивается сочетанием варьируемых геометрических параметров;
- индикаторная мощность одноцилиндрового двигателя не ниже 13 кВт.

В работе критериями качества приняты:

- удельный эффективный расход топлива, являющийся также и функциональным ограничением при сравнении результатов в пробных точках с исходной моделью КС;
- относительная масса NO_x , приведенная к массе топлива;
- относительная масса сажи, также приведенная к массе топлива.

Результаты расчета пробных точек показывают, что изменением формы камеры сгорания в поршне возможно добиться снижения концентрации NO_x и сажи в отработанных газах при неизменном и пониженном, относительно начальной формы КС, расходе топлива.

В сравнении с базовой формой КС в эффективных точках обеспечивается снижение выбросов NO_x и сажи. Из всех рассмотренных точек только 17, 19, 22 и 24 являются эффективными по трем выбранным критериям качества. При этом, например, для расчета вектора 17, в сравнении с базовой КС, выбран угол фаски $1,86^\circ$ (базовый 0°), увеличенный в два раза параметр Tm и радиус $R6$, увеличенный с 1 мм до 7,496 мм. Аналогичную форму КС обеспечивают векторы 22 и 24.

Литература

1. Wrublewski A. Results of creating a combustion chamber model for solving an optimization tasks / A. Wrublewski, Y. Hraivoronskyi // *Автомобильный транспорт: сб. науч. тр.* – 2014. – Вып. 35. – С. 87–93.
2. Bianchi G.M. Numerical Study of the Combustion Chamber Shape for Common Rail H.S.D.I. Diesel Engines / G.M. Bianchi,

P. Pelloni, F.E. Corcione, E. Mattarelli, F. Luppino Bertoni // *SAE Paper 2000-01-1179*, 2000.

3. De Risi A. Optimization of the combustion of direct injection diesel engines / A. De Risi, T. Donateo, D. Laforgia // *SAE Paper 2003-01-1064*, 2003.
4. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.
5. Статников Р.Б. Поиск оптимальных решений с помощью конечно-элементных программ общего назначения / Р.Б. Статников, И.Б. Матусов // *ДАН РФ*. – 1994. – №4. – С. 481–484.

References

1. Wrublewski A., Hraivoronskyi Y. Results Of Creating A Combustion Chamber Model For Solving An Optimisation Tasks. *Avtomobilniy transport: sb. nauch. tr.* Automobile transport: coll. of scien. works, 2014, Vol. 35, pp. 87–93.
2. Bianchi G.M., Pelloni P., Corcione F.E., Mattarelli E., Luppino Bertoni F. Numerical Study of the Combustion Chamber Shape for Common Rail H.S.D.I. Diesel Engines. *SAE Paper 2000-01-1179*, 2000.
3. De Risi, A., Donateo, T., Laforgia, D. Optimization of the combustion of direct injection diesel engines. *SAE Paper 2003-01-1064*, 2003.
4. Sobol I., Statnikov R. *Vybor optimalnysh parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami* [The choice of optimal parameters in problems with many criteria]. Moscow, Drofa Publ., 2006, 175 p.
5. Statnikov R., Matusov I. Poisk optimalnyh resheniy s pomoshy konichno-elementnyh programm obshogo naznacheniya. [The search for optimal solutions using finite element programs of general purpose]. *DAN RF - Reports of the Academy of Sciences RF*, 1994, Vol. 4, pp. 481-484.

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

Статья поступила в редакцию 25 июня 2015 г.