УДК 004. 588

ББК 74.5

А. М. Сафарбаков

Иркутск, Россия

С. А. Ходацкий

Иркутск, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

В статье приведена методология решения оптимизационной задачи по выбору основных характеристик импульсной камеры сгорания. Рассмотрены элементы системы. Проведен выбор критерия, на основе которого можно оценить характеристики системы или ее модели с тем, чтобы выявить «наилучшую» модель или множество «наилучших» условий функционирования системы. Проведен выбор метода оптимизации и приведены результаты решения оптимизационной задачи.

Ключевые слова: оптимизация, математическая модель, критерий, ограничения, алгоритм.

UDC 004.588

BBK 74.5

A.M. Safarbakov

Irkutsk, Russia

S.A. Hodackij

Irkutsk, Russia

PERFORMANCE OPTIMIZATION OF A PULSE-TYPE COMBUSTION CHAMBER

The article describes methodology of solving an optimization problem on choice of the main performances of a pulse-type combustion chamber. The system elements were considered. The authors demonstrate how to choose the criterion which provides evaluation of performances of the system or its model to figure out “the best” model or a set of “the best” conditions for system operation. The choice of an optimization method was demonstrated and the results of solving the optimization problem are provided.

Keywords: optimization, mathematical model, criterion, limitations, algorithm.

В процессе проектирования сложных технических объектов нередко ставится задача определения наилучших значений параметров объектов. Такая задача называется оптимизационной. Если оптимизация связана с расчётом оптимальных значений параметров при заданной структуре объекта, то она называется параметрической оптимизацией. **Оптимизация** (optimization) − процесс нахождения *экстремума функции*, т. е. выбор наилучшего варианта из *множества* возможных, процесс выработки *оптимальных решений или п*роцесс приведения *системы* в наилучшее (оптимальное) *состояние.*

Для того чтобы решить оптимизационную задачу необходимо:

- установить границы подлежащей рационализации инженерной системы;
- определить количественный критерий, на основе которого можно провести анализ вариантов с целью выявления «оптимального» и осуществить выбор внутрисистемных переменных, которые используются для определения характеристик и идентификации вариантов;
- построить модель, отражающую взаимосвязи между переменными.

Прежде чем приступить к исследованию, важно четко определить границы изучаемой системы (пространство поиска возможных решений). Границы системы задаются пределами, отделяющими систему от внешней среды.

Исследуемая система (*рис. 1*) представляет собой объем, ограниченный обечайкой 3 импульсной камеры сгорания, во фронтовом устройстве 1 которой установлен периферийный завихритель потока 2. Через фронтовое устройство подается сжатый воздух, который, проходя через завихритель, получает определенную степень закрутки. Крутка потока в завихрителе определяет объем циркуляционной зоны в камере сгорания. От объема циркуляционных зон во многом зависит качество топливно-воздушной смеси и, как следствие, ее горение.

Кроме того, объем циркуляционных зон, возникающих в камере сгорания, зависит от ее диаметра и от диаметра сопла 4.

Таким образом, исследуемая система представляет собой замкнутый цилиндрический объем с фронтовым устройством в виде обратного клапана и завихрителя, пропускающим в данный объем сжатый воздух. На выходе из цилиндра имеется дросселирующее устройство, из которого выходит поток [Исаев, 2014, с. 143].

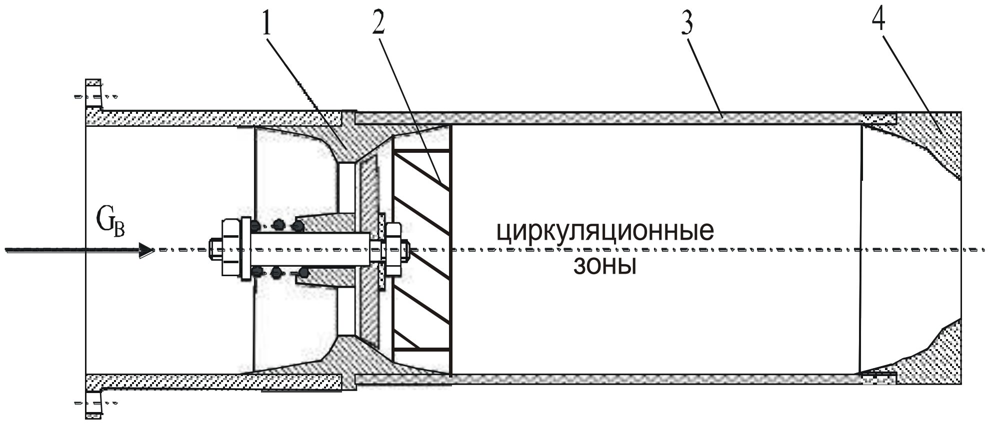

Рис. 1. Исследуемый объект. Схема изучаемой системы

Если определена подлежащая исследованию система и ее границы установлены, то следующим этапом постановки задачи является выбор критерия, на основе которого можно оценить характеристики системы или ее модели с тем, чтобы выявить «наилучшую» модель или множество «наилучших» условий функционирования системы.

Под критерием понимается степень достижения целей системой.

При решении задачи по обеспечению горения топливовоздушной смеси в импульсной камере сгорания использованы два критерия. Это −критерий первого рода и критерий второго рода.

Критерий эффективности первого рода – степень достижения целей системой в заданной области. Применительно к решению задачи по обеспечению горения топливовоздушной смеси в камере сгорания необходимо за критерий эффективности первого рода принять величину импульса тяги вырабатываемого импульсной камерой сгорания, так как он удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к критерию эффективности разрабатываемой системы. А наилучший путь для увеличения импульса тяги можно найти через критерий эффективности второго рода, который бы характеризовал структуру и объём циркуляционных зон в камере сгорания.

Критерий эффективности второго рода – оценка эффективности на некотором заданном пути достижения цели. Критерий второго рода по отношению к критерию первого рода является вторичным, поскольку главным для системы является достижение целей. За критерий эффективности второго рода можно взять объем циркуляционных зон в камере сгорания.

По критерию эффективности второго рода оценивается эффективность управляющего воздействия, создаваемого периферийным завихрителем потока.

Выбор величины объема циркуляционных зон в камере сгорания в качестве критерия эффективности второго рода обусловлен следующим. Известно, что при задании расхода воздуха через фронтовое устройство в камере сгорания возникнут циркуляционные течения. От их интенсивности во многом зависит качество образования топливовоздушной смеси. Качественно перемешанная топливовоздушная смесь сгорит в объеме камеры сгорания с большим выделением тепла и образованием высокого давления, что окажет существенное влияние на импульс реактивной тяги от газов, истекающих через сопло.

Известно, что объем циркуляционных зон во многом зависит от геометрических параметров завихрителя и камеры сгорания.

Таким образом, за критерий эффективности второго рода, который характеризует наилучший путь движения системы «импульсная камера сгорания» к цели, можно взять критерий «объем циркуляционных зон в камере сгорания». На объем циркуляционных зон существенное влияние оказывают геометрические характеристики завихрителя и камеры сгорания. В данном случае, при выборе геометрических характеристик завихрителя и камеры сгорания объем циркуляционных зон должен быть максимальным. Затем по основному критерию можно будет оценить эффективность предложенных решений.

На следующем этапе решения задачи оптимизации построена модель взаимосвязи переменных и отражающая влияние независимых переменных на степень достижения цели исследования (на критерий).

Имеется импульсная камера сгорания трубчатого типа с фронтовым устройством в виде обратного клапана и периферийного завихрителя установленного за обратным клапаном.

Сформируем математическую модель решаемой задачи. Анализируя результаты экспериментальных исследований по гидродинамическому испытанию камеры сгорания в установке гидробассейн, можно сказать, что на объем и интенсивность циркуляционных зон существенное влияние оказывают геометрические характеристики завихрителя, диаметр камеры сгорания и диаметр сопла камеры сгорания. Влияние этих параметров на объем циркуляционных зон установлено в результате проведения экспериментальных исследований.

Таким образом, можно записать выражение, характеризующее воздействие выделенных параметров на величину объема циркуляционных зон в импульсной камере сгорания

$$V_{ЗОТ} = f(\theta^0; \bar{z}; \bar{c}; \bar{s}; \bar{D}_{КС}; \bar{D}_C).$$

Данное уравнение представляет собой в самом общем виде математическую модель решаемой задачи.

В нашем случае решаемая задача сводится к поиску максимума функции

$$V_{ЗОТ} \to \max.$$

Решение данной задачи организуется в рамках следующей системы ограничений:

- угол установки лопаток завихрителя θ^0 =0…90^0;

- высота лопатки завихрителя $\bar{z}$ =0,09…0,18;

- шаг установки лопаток завихрителя $\bar{s}$ =0,31…0,73;

- длина хорды лопатки завихрителя $\bar{c}$ =0,5…1,1;

- диаметр камеры сгорания $\bar{D}_{KC}$ =1,39…2,67;

- диаметр сопла камеры сгорания $\bar{D}_C$ =0,2…1,4.

Основная цель применения математических методов оптимизации состоит в том, чтобы осуществить этот вычислительный процесс наиболее эффективным способом.

Некоторые простейшие, широко известные методы отыскания экстремумов обычно непригодны для решения задач с большим количеством переменных. Поэтому проблема выбора наиболее целесообразного метода поиска минимума или максимума целевой функции из числа существующих имеет большое значение.

Очень часто методы определения экстремума нелинейной функции при наличии ограничений на оптимизируемые параметры в виде неравенств делят по признаку организации процесса поиска на методы слепого и направленного поиска.

К методам слепого поиска относятся метод сплошного перебора вариантов (метод прямого упорядочения вариантов по критерию эффективности) и метод статистических испытаний (метод Монте-Карло).

К методам направленного поиска относятся градиентный метод, метод наискорейшего спуска, метод покоординатного спуска и др. Однако все эти методы позволяют проводить оптимизацию только по одному влияющему параметру и минимизируют или максимизируют функцию только одного параметра. В данном случае в работе ставится задача нахождения экстремума функции с учетом всех факторов, которые оказывают на неё влияние.

Для построения математической модели изменения объема циркуляционных зон в работе применяется Метод группового учёта аргументов (МГУА) (Group Method of Data Handling, GMDH) − метод порождения и выбора регрессионных моделей оптимальной сложности [Ивахненко, 1989, с. 142]. Под сложностью математической модели в МГУА понимается число параметров. Для составления математической модели используется базовая модель, подмножество элементов которой должно входить в искомую модель. Для выбора моделей используются внешние критерии, специальные функционалы качества моделей, вычисленные на тестовой выборке. МГУА рекомендуется к использованию в том случае, когда выборка содержит несколько элементов. Когда при построении регрессионных моделей использовать статистические гипотезы о плотности распределения, например, гипотезу о Гауссовом распределении, невозможно, используется индуктивный подход, согласно которому последовательно порождаются модели возрастающей сложности до тех пор, пока не будет найден минимум или максимум критерия эффективности. Достижение глобального минимума или максимума критерия эффективности означает, что модель, определяющая такой экстремум, является искомой. Экстремум критерия качества определяет модель оптимальной структуры.

Целью МГУА является достижение минимума среднеквадратической ошибки (СКО) на всех экспериментальных точках при заранее заданном виде уравнения регрессии. Поэтому, пользуясь алгоритмами МГУА, необходимо разбивать данные наблюдений на две части: проверочную и обучающую последовательности. При этом для оптимизации коэффициентов уравнения регрессии используют обучающую последовательность, как и в обычном регрессионном анализе, а для оценки степени регулярности по величине относительного значения СКО используют проверочную.

При решении задачи о выборе наилучших геометрических характеристик завихрителя использовался параметрический комбинаторный алгоритм (COMBI).

Комбинаторный алгоритм исторически являлся одним из первых алгоритмов, реализующих основные положения метода группового учета аргументов. Алгоритм изначально использовал полиномиальный базис функций для генерации структур моделей и метод наименьших квадратов для оценки их параметров. Идея алгоритма состоит в организации полного перебора всех полиномов в рамках заданных ограничений с целью нахождения структуры и параметров, минимизирующих значение внешнего критерия качества моделей. Таким образом, общая схема комбинаторного алгоритма включает следующие операции:

- по методу наименьших квадратов (МНК) определяются коэффициенты всех частных моделей при сложности $s=1, s=2, ..., s=n$;

- для каждой модели вычисляется значение внешнего критерия селекции;

- единственная модель оптимальной сложности выбирается по минимальному критерию.

В структуре алгоритма выделяются три основных блока:

1) преобразования исходных данных в соответствии с выбранной системой опорных (базисных) функций, в которой ищется модель;

2) генерирования (перебора) полного или неполного множества усложняющихся частных моделей в выбранном базисе;

3) вычисления значения некоторого критерия селекции, имеющего свойства внешнего дополнения, и последовательного отбора частных моделей, лучших по этому критерию.

Если заданы значения некоторых входных переменных $z_1, z_2, ..., z_v$ моделируемого объекта и максимальная степень полинома, то число слагаемых «n» в полном полиноме степени $\sigma_{\max}$ от v переменных определяется по уравнению

$$n = \prod_{i=1}^{v} \frac{\sigma_{\max} + 1}{i}.$$

Полный полином базисной модели записывается в следующем общем виде:

$$y = \sum_{i=1}^{n} a_i \prod_{j=1}^{v} z_j^{\sigma ij} = \sum_{i=1}^{n} a_i x_i ,$$

где каждый обобщенный линейный аргумент x_i является нелинейной функцией исходных переменных z_j:

$$x_i \prod_{j=1}^{v} z_j^{\sigma ij}.$$

Итак, члены x_i полного полинома являются базисным набором опорных функций для комбинаторного алгоритма. Описанная процедура позволяет сформировать матрицу измерений обобщённых аргументов $X[Nxn]$, где N – число точек измерений.

Матрицу X следует разделить на обучающую C длиной N_C и тестовую L длиной N_L, причем $N_C + N_L = N$.

Основными операциями, при генерировании моделей, являются:

- формирование структуры очередной частной модели;
- формирование соответствующей нормальной системы уравнений;
- решение полученной системы (оценка коэффициентов модели).

Формирование структур частных моделей формализуется с помощью двоичного структурного вектора $d = (d_1, d_2, ..., d_n)$. Если элемент d_i этого вектора принимает значение 1, то соответствующий i-й аргумент включается в частную модель, если – 0, то не включается $i = 1, 2, ..., n$. Изменение состояний вектора d можно организовать многими способами, но наиболее простым по своей идее является следующий способ: получать все возможные варианты размещения в векторе d сначала одной единицы (всего $C_n^1 = n$ вариантов), затем двух (всего $C_n^1 = 0.5n(n+1)$ вариантов) и т. д. вплоть до n единиц ($C_n^n = 1$ вариант). Таким образом, на k-й селекции число генерируемых моделей будет равно C_n^k. В соответствии с приведенной схемой алгоритм работает так. Сначала определяются все модели при $s = 1$, т. е. состоящие лишь из одного аргумента:

$$q_1 = a_1,\ q_2 = a_2 x_1,\ q_3 = a_3 x_2, \ldots,\ q_n = a_n x_n.$$

Далее рассматриваются все возможные модели при $s = 2$, состоящие из двух аргументов:

$$q_1 = a_1 + a_2 x_1,\ q_2 = a_1 + a_3 x_2, \ldots,$$

$$q_i = a_1 + a_0 x_2 x_3, \ldots,\ q_j = a_2 x_1 + a_3 x_3, \ldots,$$

$$q_{k-1} = a_2 x_1 + a_0 x_2 x_3, \ldots,\ q_k = a_0 x_1 x_3 + a_0 x_2 x_3.$$

Аналогично строятся частные модели при $s=3$, при $s=4$ и т. д. до $C_n^n=1$ Модели при $s=n$, т. е. до полного полинома.

Общее число вариантов составит $p_n=2^n-1$ различных структур, т. е. полный перебор. Однако программная реализация этого способа является далеко не быстродействующей, и такой перебор структур целесообразно применять только в алгоритмах неполного перебора.

Очевидно, что p_n при увеличении «n» очень быстро возрастает (например, $p_{10}=1024$, а $p_{15}=32768$). Поэтому возможности комбинаторного перебора ограничены. Существуют некоторые способы ускорения счета при полном переборе. Например, оптимальная схема перебора, основанная на вычислении коэффициентов последовательно получаемых частных моделей с помощью метода окаймления, позволяет увеличить n примерно до 23.

При большом «n» приходится применять целесообразное усечение перебора. Например, известен способ усечения треугольника перебора: рассматриваются все модели со сложностью от $s=1$ до $s=\max$, а модели с большим числом аргументов исключаются из перебора. Максимальная сложность $s_{\max}$ задается, исходя из возможности ЭВМ.

Наиболее компактной и универсальной является схема изменения двоичного вектора по принципу работы двоичного счётчика, в последний разряд которого добавляется единица. При этом существенно то, что соблюдается взаимно однозначное соответствие между порядковым номером очередной частной модели и состоянием структурного вектора. Этот способ алгоритмически очень прост и весьма удобен именно при полном переборе, несмотря на то, что количество и состав аргументов в частных моделях все время меняются. Более того, он позволяет даже организовать рекуррентную процедуру перебора. Для формирования нормальной системы уравнений, соответствующей очередному структурному вектору, можно поступить формально. Из столбцов полной матрицы X, указанных единичными элементами d, составляется частная матрица X_1, а затем вычисляются элементы нормальной матрицы $X_1^T X_1, X_1^T Y$. Однако при полном переборе этот формальный путь является наихудшим, поскольку приводит к многократному вычислению одних и тех же скалярных произведений. Например, для структур 010, 011 и 110 трижды вычисляется одна и та же величина

$$x_2^T x_2 = \sum_{j=1}^{N} x_{2j}^2 .$$

Поэтому в комбинаторном алгоритме достаточно только один раз вычислить матрицы полной нормальной системы:

$$X^T X = \begin{bmatrix} X_1^T X_1 & X_2^T X_1 & \dots & X_1^T X_n \\ X_2^T X_1 & X_2^T X_2 & \dots & X_2^T X_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n^T X_1 & X_n^T X_2 & \dots & X_n^T X_n \end{bmatrix}, X^T Y = \begin{bmatrix} X_1^T Y \\ X_2^T Y \\ \dots \\ X_n^T Y \end{bmatrix}.$$

Для получения любой частной нормальной системы достаточно взять элементы матрицы $X^T X$, находящиеся на пересечении строк и столбцов, указанных единицами вектора d, а также соответствующие элементы вектора $X^T Y$. Для решения каждой нормальной системы $X_i^T X_i a_i = X_i^T y$, т. е. для вычисления оценок коэффициентов частной модели, можно применять любые процедуры решения систем алгебраических уравнений (с симметричной матрицей) с хорошими вычислительными свойствами.

Отбор моделей, лучших по заданному критерию I, обычно выполняется не в конце перебора (когда получены все частные модели), а в процессе его. Для этого запоминаются значения критерия для заданного числа F первых моделей, а затем величина критерия каждой последующей модели I_i сравнивается с худшим $I_{\max}$ из F значений. Если $I_i < I_{\max}$, то новая модель запоминается вместо худшей (запоминаются структура, оценки коэффициентов и критерий); если же $I_i \geq I_{\max} I_i$, то эта модель пропускается. После окончания перебора оставшиеся F моделей являются лучшими из всех p_n в смысле заданного критерия. Очевидно, что при таком подходе блоки генерации и отбора алгоритмически объединяются. Необходимо отметить, что в алгоритмах МГУА обычно выполняется еще один этап вычислений – оценка качества отобранных лучших моделей. При этом вычисляются, например, среднеквадратическая ошибка аппроксимации и ошибка экстраполяции.

Таким образом, для решения задачи по выбору наиболее лучших геометрических параметров завихрителя и камеры сгорания объект представляется в виде совокупности состояний $a_1, a_2, ..., a_k$. Каждое состояние характеризуется набором параметров $(x_1, x_2, ..., x_n, x_{n+1})$ (геометрические параметры завихрителя и камеры сгорания) номенклатура которых устанавливается: $a = a_i(x_1, x_2, ..., x_n, x_{n+1})$.

Среди рассматриваемых параметров выделяются наиболее значимые, которые характеризуют цель исследования. Именно такой смысл вкладывают в термин результативный признак и обозначают его Y_0 (объем циркуляционных зон в камере сгорания). Таким параметром является x_{n+1}, поэтому $Y_0 = x_{n+1}$. Результаты гидродинамических исследований по определению влияния геометрических параметров сводятся в *табл. 1* исходных данных.

Таблица 1

Исходные данные

Номер состояния	Параметры системы						
	$x_1(\theta)$	$x_2(\bar{z})$	$x_3(\bar{c})$	$x_4(\bar{s})$	$x_5(\bar{D}_{KC})$	$x_6(\bar{D}_C)$	$Y_0 = x_{n+1}$
a_1	0,4674	0,4497	0,4515	0,4251	0,8124	0,3526	36,1238
a_2	0,5133	0,5126	0,5162	0,4764	0,8243	0,3769	38,7295
a_3	0,5681	0,5324	0,5514	0,5015	0,8493	0,3991	39,9564
a_4	0,5424	0,5481	0,5836	0,5237	0,8451	0,4314	41,8999
a_5	0,5312	0,5499	0,6187	0,5469	0,8437	0,4533	47,5387
a_6	0,5267	0,5512	0,5782	0,5634	0,8399	0,4861	47,8531
a_7	0,5013	0,5584	0,5491	0,5823	0,8484	0,5234	48,2131
a_8	0,4861	0,5641	0,5037	0,5918	0,8311	0,5846	51,0832
a_9	0,4639	0,5689	0,4643	0,5767	0,8193	0,5632	51,8934
a_{10}	0,4498	0,5734	0,4238	0,5614	0,8031	0,5417	52,7312

a_{11}	0,4384	0,5548	0,4214	0,5236	0,7552	0,5319	53,1183
a_{12}	0,4246	0,5329	0,4191	0,5047	0,7167	0,5143	53,3527
a_{13}	0,4147	0,5127	0,4153	0,4814	0,6834	0,5027	53,5721
a_{14}	0,4002	0,5046	0,4132	0,4792	0,6971	0,4894	53,9215
a_{15}	0,3826	0,4949	0,3943	0,4657	0,7034	0,4749	53,7159
a_{16}	0,3751	0,4894	0,3743	0,4523	0,7231	0,4629	53,4892
a_{17}	0,3697	0,4724	0,3611	0,4401	0,6879	0,4591	52,7391
a_{18}	0,3634	0,4631	0,3547	0,4294	0,6764	0,4513	52,4682
a_{19}	0,3594	0,4519	0,3318	0,4036	0,6612	0,4424	52,1258
a_{20}	0,3511	0,4459	0,3171	0,3891	0,6581	0,4543	51,6977
a_{21}	0,3395	0,4391	0,2769	0,3681	0,6709	0,4714	51,7058
a_{22}	0,3254	0,4254	0,2437	0,3458	0,6814	0,4843	51,7243
a_{23}	0,3025	0,4195	0,2011	0,3221	0,6934	0,4912	51,7513
a_{24}	0,2584	0,4121	0,1895	0,2794	0,7052	0,3279	51,7925
a_{25}	0,1829	0,4057	0,1759	0,2264	0,7156	0,2561	51,8299
a_{26}	0,1171	0,3998	0,1651	0,1721	0,7213	0,1734	51,9519

Необходимо определить математическую зависимость результативного признака Y_0 с набором управляемых параметров $x_1, x_2, ..., x_n$, которые являются независимыми.

Построение и анализ уравнения $Y = \varphi(x_0)$ являются основополагающим моментом, поскольку результативный признак используется в дальнейшем для управления объектом и позволяет исследуемой системе достичь экстремальных уровней. Для создания исходных данных для метода группового учета аргументов используются разностные уравнения МГУА.

Рассмотрим применение алгоритмов МГУА для оценки структуры циркуляционных зон модели.

Рассматриваются все возможные комбинации следующего полинома:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_1^2 + a_8x_1x_2 + a_9x_1x_3 +$$
$$+a_{10}x_1x_4 + a_{11}x_1x_5 + a_{12}x_1x_6 + a_{13}x_2^2 + a_{14}x_2x_3 + a_{15}x_2x_4 + a_{16}x_2x_5 + a_{17}x_2x_6 +$$
$$+a_{18}x_3^2 + a_{19}x_3x_4 + a_{20}x_3x_5 + a_{21}x_3x_6 + a_{22}x_4^2 + a_{23}x_4x_5 + a_{24}x_4x_6 + a_{25}x_5^2 +$$
$$+a_{26}x_5x_6 + a_{27}x_6^2$$

Получив значения коэффициентов регрессии, найдем корни полиномиального уравнения, с помощью программы оптимизации.

$$y = 0.4041 - 0.1490x_1 + 9.6220x_2 - 1.6460x_3 - 4.1780x_4 - 0.0044x_5 - 7.6540x_6 +$$
$$+1.9120x_1^2 + 66.1000x_1x_2 - 1.1780x_1x_3 + 29.7300x_1x_4 + 0.3164x_1x_5 + 2.3450x_1x_6 +$$
$$+0.4528x_2^2 + 0.1489x_2x_3 + 0.7690x_2x_4 - 0.0415x_2x_5 + 4.8110x_2x_6 + 5.3920x_3^2 +$$
$$+0.6139x_3x_4 + 0.2842x_3x_5 + 0.4157x_3x_6 + 0.0374x_4^2 + 5.2710x_4x_5 + 0.1651x_4x_6 +$$
$$+2.8110x_5^2 + 0.7687x_5x_6 + 5.1930x_6^2$$

В результате решения оптимизационной задачи получены следующие геометрические характеристики завихрителя и камеры сгорания [Исаев, 2016, № 88]:

- оптимальный угол установки лопаток завихрителя, при котором величина циркуляционных максимальна $\theta = 52^0$;
- оптимальная высота лопатки, при которой величина циркуляционных зон будет максимальна $\bar{z} = 0.2$;
- оптимальная длина хорды лопатки, генерирующая максимальный объем циркуляционных зон равна $\bar{c} = 0.8$;
- густота решетки завихрителя, при котором объем циркуляционных зон максимален, равен $\bar{s}$ =0.43, что соответствует 10 лопаткам;
- наилучший диаметр камеры сгорания ограничен конструктивными соображениями и соответствует $\overline{D}_{кс}$= 1.79;
- оптимальная величина диаметра поперечного сечения сопла импульсной камеры сгорания равняется $\overline{D}_{с}$=0,41.

Таким образом, решение оптимизационной задачи позволило уточнить оптимальные геометрические характеристики завихрителя и камеры сгорания. В свою очередь, такие геометрические параметры исследуемого объекта позволят улучшить смесеобразование в камере сгорания, что повысит качество горения топливовоздушной смеси.

Библиографический список

1. *Исаев А. И.* Оптимизация управляющего воздействия на вихревую структуру в импульсной камере сгорания / А. И. Исаев, А. М. Сафарбаков, Ю. И. Майрович // Решетневские чтения. Материалы XVIII Международной научной конференции- Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2014. С.143.
2. *Ивахненко А. Г.* Индуктивный метод самоорганизации сложных систем. Киев: «Наукова думка», 1982. 296 с.
3. *Исаев А. И.* Влияние геометрических характеристик завихрителя на вихревую структуру потока в импульсной камере сгорания / А. И. Исаев, А. М. Сафарбаков, С. А. Ходацкий, Ю. И. Майрович // Труды МАИ. – М.: МАИ, 2016. № 88. [Электронный ресурс]. URL: http://trudy.mai.ru/published.php?ID=70631. (дата обращения: 10.10.2017).

References

1. *Isaev A.I.(2014).* Control optimization of the vortex structure in the pulse-type combustion chamber / A. I. Isaev, A. M. Safarbakov, Ju. I. Majrovich // Reshetnev reading. Materials of 18th international scientific conference - Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University, 2014. P.143. (in Russian).
2. *Ivahnenko A. G. (1982).* Inductive method of complex system self-organization. Kiev: «Naukova dumka», 1982. 296 p. (in Russian).
3. *Isaev A.I. (2016).* Effects of geometrical adjectives of a swirl nozzle on the airflow vortex structure in the pulse-type combustion chamber / A. I. Isaev, A. M. Safarbakov, S. A. Hodackij, Ju. I. Majrovich // MAI works. – M.: MAI, 2016. № 88. [electronic source]. URL: http://trudy.mai.ru/published.php?ID=70631. (accessed date: 10.10.2017). (in Russian).