

Геометрическое моделирование и оптимизация конструктивных характеристик котлоагрегата

О.С. Воронова¹

kornilova.oly@mail.ru

¹ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
г. Макеевка, Донецкая Народная Республика

В данной статье предложена геометрическая модель и вычислительный алгоритм на основе точечных уравнений зависимости конструктивных характеристик конвективной части котлоагрегата с учётом невязки теплового баланса. Полученная геометрическая модель даёт возможность определить оптимальное соотношение внутреннего диаметра конвективных труб и их количества с минимальным значением невязки теплового баланса.

Ключевые слова: конструктивные характеристики, котлоагрегат, конвективная часть, невязка теплового баланса, геометрическая модель, факторы влияния, поверхность отклика, точечное уравнение.

Geometrical modeling and optimization the constructive characteristics of the boiler

O.S. Voronova¹

kornilova.oly@mail.ru

¹Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, Donetsk People's Republic

In this article have been proposed the geometric model and the computational algorithm based on the point equations for the dependence of the constructive characteristics convective part of the boiler, taking into account the heat balance residual. The resulting geometric model makes it possible to determine the optimum ratio of the internal diameter of convective pipes and their number with the minimum value of the heat balance residual.

Keywords: constructive characteristics, boiler, convective part, heat balance residual, geometric model, influence factors, response surface, point equation.

1. Введение

В процессе проектирования котлоагрегатов (КА) большое значение имеет расчёт и оптимизация конструктивных характеристик КА. На сегодняшний день в инженерной практике существуют различные подходы к моделированию и расчёту конструктивных характеристик КА, основанных на тепловом балансе с учётом тепломассообменных процессов в топочной камере и конвективной части [5]. Кроме классических методов моделирования и оптимизации, также распространение получили инновационные методы с использованием современной вычислительной техники. Так в работе [6] для математического моделирования и оптимизации КА используются теория графов и численные методы моделирования, среди которых в первую очередь автор предлагает использовать метод Ньютона. В работах [7, 8] используются системы конечно-элементного анализа для проектирования и оптимизации жаротрубных КА. Основным недостатком предложенных подходов оптимизации является сложный и трудоёмкий вычислительный алгоритм моделирования и расчёта тепломассообменных процессов, требующий от проектировщика специальной подготовки. В работе [4] была предложена упрощённая методика численного расчёта конструктивных параметров КА на примере двухконтурного пароконденсационного котла. Но даже упрощённая методика предполагает достаточно сложный расчёт конвективного теплообмена, что значительно затрудняет оптимизацию конструктивных элементов КА.

В данной работе приводится пример использования методов геометрического моделирования и оптимизации конструктивных размеров КА с использованием поверхности отклика и методов математического анализа.

Для аналитического описания геометрической модели и её оптимизации используется математический аппарат БН-исчисление (точечное исчисление Балубы-Найдыша [1-3]).

2. Исходные данные для моделирования

Жаротрубный КА представляет собой топочную камеру и конвективный газоход, и является сложным теплообменным аппаратом, где происходит процесс горения топлива, а также теплопередача от дымовых газов к теплоносителю.

Поскольку габариты котла менять нежелательно для оптимизации работы КА обычно используют конструктивные элементы конвективных газоходов. Основными конструктивными характеристиками конвективного газохода жаротрубного КА являются следующие параметры:

d_c – внутренний диаметр конвективных труб, м;

z – количество конвективных труб, шт.

Профессором Лукьяновым А.В. была предложена методика [5] поверочного расчёта теплообмена в топке и конвективной части жаротрубных КА, которая используется для инженерно-технических работников предприятий и проектных организаций котлостроения, а также для студентов, обучающихся по специальности «Телогазоснабжение и вентиляция» ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Эта методика основана на тепловом балансе КА, для соблюдения которого невязка теплового баланса ΔQ должна быть в пределах 2%.

Воспользуемся методикой, предложенной Лукьяновым А.В., для сбора исходной экспериментально-статистической информации, необходимой для геометрического моделирования и оптимизации конструктивных размеров КА. В качестве примера

воспользуемся паспортными данными теплогенератора КВ-0,3 с номинальной теплопроизводительностью 0,3 МВт.

Другие исходные данные:

1. Температура уходящих газов – 150 °С.
2. Параметры теплоносителя – 95/65.
3. Топливо – природный газ.
4. Газопровод – Средняя Азия – Центр.

В данном случае внутренний диаметр конвективных труб и их количество будут выступать факторами, влияющими на функцию отклика – невязку теплового баланса. Ограничим факторы влияния в следующих пределах: $d_e=0,03-0,07$ м; $z=10-50$ шт. Далее при помощи офисного пакета MS Excel был выполнен расчёт 36 последовательных комбинаций факторов влияния с вычислением значения функции отклика. Результаты расчёта представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные экспериментально-статистические данные для геометрического моделирования и оптимизации конструктивных размеров КА.

№ п/п	d_e , м	z , шт	ΔQ , %	№ п/п	d_e , м	z , шт	ΔQ , %
1.	0,03	10	17,26	19.	0,054	10	26,28
2.	0,03	18	32,01	20.	0,054	18	16,7
3.	0,03	26	42,22	21.	0,054	26	9,96
4.	0,03	34	50,18	22.	0,054	34	4,62
5.	0,03	42	56,79	23.	0,054	42	0,13
6.	0,03	50	62,48	24.	0,054	50	3,78
7.	0,038	10	2,8	25.	0,062	10	33,77
8.	0,038	18	9,52	26.	0,062	18	25,01
9.	0,038	26	18,08	27.	0,062	26	18,8
10.	0,038	34	24,78	28.	0,062	34	13,85
11.	0,038	42	30,36	29.	0,062	42	9,65
12.	0,038	50	35,18	30.	0,062	50	5,97
13.	0,046	10	16,41	31.	0,07	10	39,65
14.	0,046	18	5,7	32.	0,07	18	31,51
15.	0,046	26	1,78	33.	0,07	26	25,68
16.	0,046	34	7,67	34.	0,07	34	20,98
17.	0,046	42	12,6	35.	0,07	42	16,98
18.	0,046	50	16,87	36.	0,07	50	13,44

3. Геометрическая модель конструктивных характеристик жаротрубного котлоагрегата

Составим геометрическую схему моделирования и конструктивных характеристик жаротрубного КА. Поскольку факторов влияния два, то геометрическим объектом, соответствующим моделируемому процессу будет двухпараметрическое множество точек, т.е. поверхность. Поэтому выберем для моделирования трехмерную декартову систему координат (рис. 1), установив соответствие между осями и значениями факторов влияния, а также функцией отклика. Так оси Ox декартовой системы координат соответствует количество конвективных труб; оси Oy – внутренний диаметр конвективных труб; оси Oz – невязка теплового баланса.

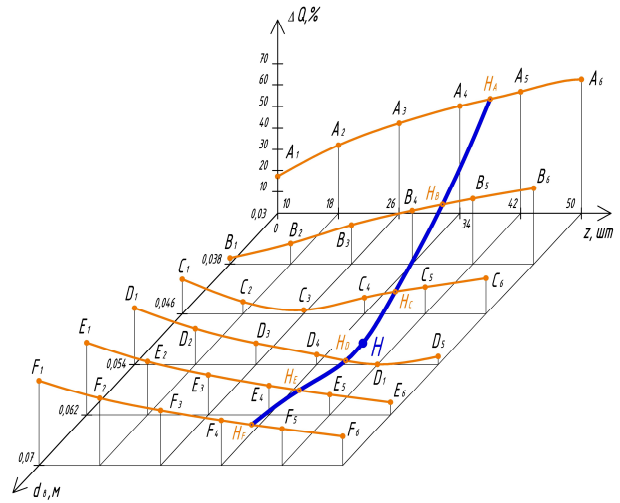


Рис. 1. Геометрическая схема моделирования поверхности отклика.

Для наглядного представления геометрической схемы (рис. 1) осям декартовой системы координат был присвоен произвольный масштаб.

В соответствии с геометрической схемой (рис. 1) сформируем 6 направляющих линий $H_A, H_B, H_C, H_D, H_E, H_F$ по 6 точек в каждой, которым соответствуют значения исходных экспериментально-статистических данных (табл. 1). Определим направляющие дуги кривых с помощью дуги кривой 5-го порядка, проходящей через 6 наперед заданных точек [3].

Для направляющей дуги кривой линии H_A точечное уравнение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 H_A = & A_1 [\bar{u}^5 - 6,4\bar{u}^4 u + 11,2\bar{u}^3 u^2 - 6,4\bar{u}^2 u^3 + \bar{u} u^4] + \\
 & + A_2 [25\bar{u}^4 u - 60,4\bar{u}^3 u^2 + 38,5\bar{u}^2 u^3 - 6,3\bar{u} u^4] + \\
 & + A_3 [-25\bar{u}^4 u + 122,9\bar{u}^3 u^2 - 95,8\bar{u}^2 u^3 + 16,7\bar{u} u^4] + \\
 & + A_4 [16,7\bar{u}^4 u - 95,8\bar{u}^3 u^2 + 122,9\bar{u}^2 u^3 - 25\bar{u} u^4] + \\
 & + A_5 [-6,3\bar{u}^4 u + 38,5\bar{u}^3 u^2 - 60,4\bar{u}^2 u^3 + 25\bar{u} u^4] + \\
 & + A_6 [\bar{u}^4 u - 6,4\bar{u}^3 u^2 + 11,2\bar{u}^2 u^3 - 6,4\bar{u} u^4 + u^5],
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где u – параметр, который определяет положение текущей точки на соответствующей направляющей, $\bar{u} = 1 - u$ – дополнение параметра до единицы.

Аналогичным образом определим точечные уравнения ещё 5-ти направляющих дуг кривых, которые также будут иметь общий согласовывающий текущий параметр u .

Дуга кривой H , которая является образующей отсека поверхности отклика, также определяется при помощи точечного уравнения дуги кривой 5-го порядка, проходящей через 6 наперед заданных точек:

$$\begin{aligned}
 H = & H_A [\bar{v}^5 - 6,4\bar{v}^4 v + 11,2\bar{v}^3 v^2 - 6,4\bar{v}^2 v^3 + \bar{v} v^4] + \\
 & + H_B [25\bar{v}^4 v - 60,4\bar{v}^3 v^2 + 38,5\bar{v}^2 v^3 - 6,3\bar{v} v^4] + \\
 & + H_C [-25\bar{v}^4 v + 122,9\bar{v}^3 v^2 - 95,8\bar{v}^2 v^3 + 16,7\bar{v} v^4] + \\
 & + H_D [16,7\bar{v}^4 v - 95,8\bar{v}^3 v^2 + 122,9\bar{v}^2 v^3 - 25\bar{v} v^4] + \\
 & + H_E [-6,3\bar{v}^4 v + 38,5\bar{v}^3 v^2 - 60,4\bar{v}^2 v^3 + 25\bar{v} v^4] + \\
 & + H_F [\bar{v}^4 v - 6,4\bar{v}^3 v^2 + 11,2\bar{v}^2 v^3 - 6,4\bar{v} v^4 + v^5],
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где v – параметр, который определяет положение текущей точки на образующей поверхности отклика, $\bar{v} = 1 - v$ – дополнение параметра до единицы.

Таким образом, получим вычислительный алгоритм формирования поверхности отклика, проходящей через 36

наперёд заданных точек, соответствующих исходным экспериментально-статистическим данным из табл. 1. Следует отметить, что полученный вычислительный алгоритм представлен в точечной форме. Для перехода от точечных уравнений к параметрическим, необходимо выполнить покоординатный расчёт, в результате которого получим систему параметрических уравнений проекций на оси декартовой системы координат (рис. 1).

Для визуального анализа результатов моделирования на рис. 2 представим визуализацию полученной геометрической модели зависимости невязки теплового баланса от внутреннего диаметра конвективных трубок и их количества при помощи программного пакета *Maple*.

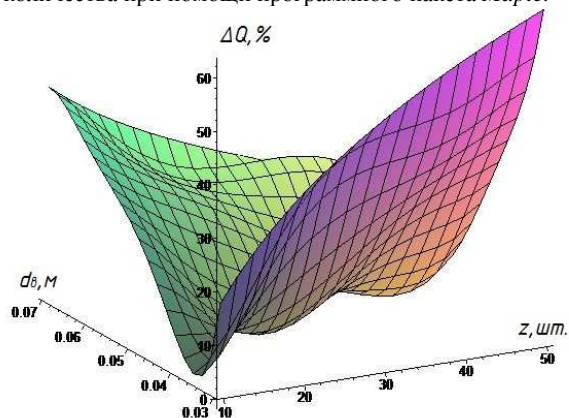


Рис. 2. Визуализация геометрической модели конструктивных характеристик КА.

4. Анализ результатов моделирования и оптимизация конструктивных характеристик котлоагрегата

Для оптимизации работы КА необходимо минимизировать невязку теплового баланса. Поскольку функция отклика соответствующая невязке теплового баланса представлена в виде двухпараметрического множества точек, то её минимизация относится к задачам теории математического анализа функции двух переменных, в соответствии с которой определим в программном пакете *Maple* точки подозрительные на экстремум. В результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial u} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial v} = 0 \end{cases}$$

были получены комбинации значений параметров u и v , из которых были выбраны комбинации удовлетворяющие условиям: $0 \leq u \leq 1$ и $0 \leq v \leq 1$. Далее подстановкой в уравнение (2) были отобраны 4 минимальных значения невязки теплового баланса. Полученные значения четырех возможных вариантов соотношения количества конвективных трубок и их диаметра проверим с помощью методики поверочного расчёта КА, которая была реализована при помощи офисного пакета *MS Excel*. В результате получим следующие значения.

Таблица 2. Анализ подбора оптимального соотношения внутреннего диаметра конвективных трубок и их количества.

№ п/п	Параметры	z, шт	d _в , м	ΔQ ₁ , %	ΔQ ₂ , %
1.	u=0,13	15	0,04	5,83	1,35
	v=0,26				
2.	u=0,36	24	0,046	1,5	0,1
	v=0,4				

3.	u=0,57	33	0,05	4,06	0,41
	v=0,51				
4.	u=0,87	45	0,055	0,65	0,04
	v=0,63				

где ΔQ₁ – значения невязки теплового баланса полученные по геометрической модели,

ΔQ₂ – значения невязки теплового баланса, которые получены по расчёту в *MS Excel*.

Как видно из результатов, представленных в таблице 2, целых 4 значения невязки теплового баланса, удовлетворяют условию $\Delta Q \leq 2\%$, что даёт возможность проектировщику выбрать наиболее оптимальный вариант, поскольку не всегда вариант, дающий минимальную невязку теплового баланса, является оптимальным для проектирования.

5. Заключение

Предложенная геометрическая модель конструктивных характеристик КА позволяет оптимизировать конструктивные размеры конвективной части жаротрубного КА.

В данном примере полного совпадения геометрической модели конструктивных характеристик котлоагрегата с поверочным расчетом КА, основанном на тепловом балансе, достигнуто не было. Однако, предложенная геометрическая модель конструктивных характеристик котлоагрегата, позволяет найти оптимальные значения соотношения количества конвективных трубок и их диаметра. Оказалось, что для данного КА таких значений, в пределах изменения параметров, может быть 4. Также просматривается некоторая зависимость между значениями внутреннего диаметра конвективных трубок и их количеством, удовлетворяющими требуемой невязке теплового баланса, что является перспективой дальнейших исследований.

6. Литература

- [1] Балюба, И. Г. Конструктивная геометрия многообразий в точечном исчислении [Текст]: дис. ... доктора техн. наук: 05.01.01 / Балюба И. Г. – Макеевка, 1995. – 227 с.
- [2] Балюба, И. Г. Точечное исчисление [Текст]: [учебное пособие] / И. Г. Балюба, В. М. Найдыш; под ред. В. М. Верещаги. – Мелитополь: МГПУ им. Б. Хмельницкого, 2015. – 236 с.
- [3] Бумага, А. И. Геометрическое моделирование физико-механических свойств композиционных строительных материалов в БН-исчислении [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05, 05.01.01 / Бумага А. И. – Макеевка, 2016. – 164 с.
- [4] Жидилов К. А. Методика математического моделирования газового водогрейного котла [Текст] / Жидилов К. А., Киселев В. Ф., Проворов В. В., Ротков С. И. – Вестник Ижевского государственного технического университета. – Ижевск: изд-во Ижевского государственного технического университета им. М. Т. Калашникова. – № 3 – С. 33-36.
- [5] Лук'янов О. В. Теплогенераторы для локальных систем теплоснабжения [Текст] / Лук'янов О. В. – Макіівка.: ДонДАБА, 2003. – 149 с.
- [6] Попырин, Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок [Текст] / Попырин Л. С. – М. Энергия, 1978 – 416с.
- [7] Хаустов С. А., Компьютерное моделирование гидродинамики жаротрубного котла с использованием конечно-элементного анализа [Текст] / Хаустов С. А., Хаустов П. А., Максимова Е. И. – Современные проблемы

науки и образования. 2014 -№. 6. С. 1 – 6. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22877366>

[8] Хаустов С.А. Современные тенденции проектирования жаротрубных котлов [Текст] / Хаустов С.А., Загорин А.С. – Вестник науки Сибири. – 2014. – №. 2 (12). – С. 21 – 28.

Об авторах

Воронова Ольга Сергеевна, ассистент кафедры специализированных информационных технологий и систем, строительного факультета Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.
Её e-mail kornilova.oly@mail.ru.