

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТНОГО ПЛАСТИНЧАТОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

**А. И. Степанова, кандидат технических наук
Институт технической теплофизики НАН Украины
e-mail: nmfialko@ukr.net**

Аннотация. Изложены результаты оптимизации геометрических параметров теплообменной поверхности контактного пластинчатого воздухоподогревателя комбинированной теплоутилизационной системы котельной установки, предназначенной для подогрева воды и дутьевого воздуха, при различных значениях температуры окружающей среды. Проанализированы алгоритмы оптимизации, применяемые в теории планирования эксперимента, и показана возможность их использования для оптимизации указанных параметров.

Ключевые слова: **эффективность, оптимизация, теплоутилизационная система**

На современном этапе развития народного хозяйства уровень использования тепловых вторичных энергоресурсов в коммунальной энергетике недостаточен, что связано, в значительной степени, с низкой эффективностью теплоутилизационного оборудования энергетических установок. В связи с этим, задача повышения эффективности такого оборудования является важной для энергетики страны. Необходимым условием решения указанной задачи является оптимизация теплоутилизационных установок с применением различных методов решения соответствующих оптимизационных задач. Обоснованный выбор таких методов повышает результативность оптимизации и, соответственно, эффективность теплоутилизационной установки, поскольку позволяет использовать при разработке ее конструкции параметры, значения которых максимально приближены к оптимальным.

Изучение возможностей использования различных подходов к анализу эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем показало, что указанные задачи могут быть решены только на основе комплексного подхода, сочетающего термодинамический, теплотехнический и технологический методы анализа. В соответствии с таким подходом, в качестве критериев оценки эффективности теплоутилизационной системы и целевых функций оптимизации могут быть использованы эксерго-технологический и теплоэксергетический критерии [1,2]:

$$k_{\text{Тех}} = (E_{\text{пот}} m_0) / Q, \quad \varepsilon = E_{\text{пот}} / Q. \quad (1)$$

Эти критерии включают такие важные характеристики системы, как внутренние потери эксергетической мощности (деструкцию) $E_{пот}$, тепловую мощность Q и удельную материалоемкость $m_0=m/Q$, что позволяет оценить совершенство теплоутилизационной системы с различных позиций и использовать указанные критерии в качестве целевых функций оптимизации при решении оптимизационных задач. Минимизация функциональных зависимостей указанных критериев эффективности от определенных параметров теплоутилизационной системы позволяет определять их оптимальные значения.

Часто на одном из этапов общей оптимизации теплоутилизационной системы целесообразно оптимизировать ее отдельные элементы, что позволяет более глубоко проанализировать работу системы и повысить точность решения общей оптимизационной задачи, задавая в качестве начальных условий уже полученные значения оптимальных параметров и уточняя их в процессе решения оптимизационной задачи.

В работе рассматривался контактный пластинчатый воздухонагреватель, входящий в комбинированную теплоутилизационную систему котельной установки, предназначенную для подогрева воды и дутьевого воздуха. Осуществление в таких системах глубокой утилизации теплоты отходящих газов котельных установок на протяжении всего отопительного периода позволяет повысить эффективность работы котлоагрегата и снизить вредные выбросы в атмосферу.

Цель исследований – получение оптимальных интервалов изменения геометрических параметров теплообменной поверхности указанного воздухонагревателя при различных значениях температуры окружающей среды с помощью алгоритмов оптимизации, применяемых в теории планирования эксперимента.

Материалы и методика исследований. С использованием статистических методов планирования эксперимента получены необходимые для оптимизации функциональные зависимости эксергетических критериев эффективности от геометрических параметров теплообменной поверхности воздухонагревателя. Варьируемые параметры – ширина пластины a , высота пластины b и расстояние между пластинами s . Поскольку в данной работе сравнительный анализ эффективности проводился для одного теплоутилизатора при различных значениях температуры окружающей среды, то в качестве целевой функции оптимизации использовался тепло-эксергетический критерий эффективности, не включающий массу теплоутилизатора. Далее приведены указанные зависимости при различных значениях температуры окружающей среды t_0 :

$$t_0 = -50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = 5,70 \cdot 10^{-1} - 2,88 \cdot 10^{-4}a + 1,07 \cdot 10^{-7}a_2 - 3,34 \cdot 10^{-4}b + 2,32 \cdot 10^{-8}ab + \\ + 1,38 \cdot 10^{-7}b_2 + 5,74 \cdot 10^{-2}s - 2,38 \cdot 10^{-5}as - 1,28 \cdot 10^{-5}bs + 1,21 \cdot 10^{-3}s_2;$$

$$t_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = 3,80 \cdot 10^{-1} - 2,72 \cdot 10^{-4}a + 1,19 \cdot 10^{-7}a_2 - 4,41 \cdot 10^{-6}b + 2,43 \cdot 10^{-9}ab + \quad (2)$$

$$+ 3,77 \cdot 10^{-9}b_2 + 3,88 \cdot 10^{-2}s - 1,63 \cdot 10^{-5}as - 2,63 \cdot 10^{-6}bs + 1,67 \cdot 10^{-4}s_2;$$

$$t_0 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = 2,70 \cdot 10^{-1} - 1,90 \cdot 10^{-4}a + 8,54 \cdot 10^{-8}a_2 + 2,08 \cdot 10^{-6}b + 8,84 \cdot 10^{-10}ab +$$

$$+ 3,61 \cdot 10^{-10}b_2 + 3,07 \cdot 10^{-2}s - 1,19 \cdot 10^{-5}as - 2,00 \cdot 10^{-6}bs + 8,16 \cdot 10^{-6}s_2.$$

Рассмотрим некоторые алгоритмы оптимизации, применяемые в теории планирования эксперимента, и возможность их использования для получения оптимальных значений и оптимальных интервалов изменения геометрических параметров теплообменной поверхности воздухонагревателя при различных температурах окружающей среды [3, 4]. В определенных случаях функциональные зависимости критериев эффективности от основных геометрических параметров теплообменной поверхности теплоутилизаторов могут быть описаны либо строго линейными уравнениями регрессии, либо уравнениями, в которых членами второго порядка, в соответствии с критерием Стьюдента, можно пренебречь. Для таких функциональных зависимостей рационально использовать алгоритм крутого восхождения Бокса-Уилсона, который объединяет положительные стороны трех методов – метода Гаусса-Зейделя, метода градиента и методов полного или дробного факторного эксперимента, как средств получения линейной математической модели. Задача алгоритма крутого восхождения заключается в осуществлении шагового движения в направлении наискорейшего изменения выходной переменной, т.е. по *grady* (x_i):

$$grady = \frac{\partial y}{\partial x_1} \vec{i} + \frac{\partial y}{\partial x_2} \vec{j} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \vec{k} \quad (3)$$

В отличие от градиентного метода, корректировка направления шагового движения производится не после каждого следующего шага, а по достижении в некоторой точке X_q на данном направлении наибольшего или наименьшего значения целевой функции, как это делается при использовании метода Гаусса-Зейделя. Для линейной модели расчет составляющих градиента реализуется вычислением произведений коэффициентов регрессии b_n на соответствующие интервалы варьирования значимых факторов ΔX_n . Тогда уравнение (3) принимает вид:

$$grady(X) = b_1 \Delta X_1 + b_2 \Delta X_2 + \dots + b_n \Delta X_n, \quad (4)$$

т.е. в качестве шагов крутого восхождения выбираются интервалы варьирования факторов. В качестве базового фактора принимается фактор, для которого произведение коэффициента регрессии на интервал варьирования максимально:

$$\max(b_1 \Delta X_1) = a. \quad (5)$$

Для базового (или другого) фактора выбирают шаг крутого восхождения h_a . Обычно этот шаг выбирается с учетом реальных

требований к эксплуатационным и конструктивным особенностям системы или по имеющейся априорной информации. Далее, с учетом того факта, что умножение составляющих градиента на любое положительное число дает точки также лежащие на градиенте, производят пересчет составляющих градиента по выбранному шагу крутого восхождения базового фактора:

$$h_j = b_i \Delta X_i h_a / a \quad (6).$$

Организация поиска наибольшего или наименьшего значения целевой функции в заданных интервалах изменения факторов осуществляется последовательным прибавлением составляющих градиента к нулевому уровню факторов. Получают серию значений факторов крутого восхождения. Переводя их в кодированную форму и подставляя в уравнение регрессии, получают ряд значений выходной переменной y . При расчетах необходимо иметь в виду, что если какой-либо из факторов в процессе движения достигает границы области определения, то его можно зафиксировать и продолжать движение по остальным факторам.

Рассмотрим в качестве примера полученную для исследуемого теплоутилизатора зависимость теплоэксергетического критерия эффективности ε от ширины пластины теплоутилизатора a , высоты пластины b и расстояния между пластинами s : $\varepsilon = f(a, b, s)$ для $t_0 = 5$ °С. С учетом незначимости некоторых коэффициентов уравнения регрессии в соответствии с критерием Стьюдента эта зависимость приобретает следующий вид:

$$\varepsilon = 2,70 \cdot 10^{-1} - 1,90 \cdot 10^{-4} a + 2,08 \cdot 10^{-6} b + 3,07 \cdot 10^{-2} s - 1,19 \cdot 10^{-5} a s. \quad (7)$$

В этом случае линейная модель не является адекватной, так как полученное уравнение включает, кроме линейных членов, члены, описывающие взаимодействие, что свидетельствует о некоторой кривизне функций отклика. Несмотря на это, может оказаться рациональным использование для оптимизации указанного метода крутого восхождения Бокса-Уилсона. В соответствии с алгоритмом этого метода, можно осуществить движение в область наименьших на заданном интервале значений целевой функции, используя только линейные члены уравнения. Действительно, в данном случае метод крутого восхождения оказался эффективным, т.к. значения выходной переменной ε , вычисленные из уравнения регрессии, оказались близки к экспериментальным значениям с точностью 5...6 %. В процессе движения в область наименьших значений целевой функции фактор a достиг своего оптимального значения $a = 1400$ мм, а два других фактора достигли границ области определения: b – верхней границы соответствующего интервала варьирования $b = 2000$ мм, s – нижней границы $s = 5$ мм. Таким образом, значения $a = 1400$ мм, $b = 2000$ мм, $s = 5$ мм можно использовать в качестве оптимальных геометрических параметров теплообменной поверхности исследуемого теплоутилизатора при $t_0 = 5$ °С. На рис. 1 представлена зависимость теплоэксергетического критерия ε от геометрических параметров теплообменной поверхности теплоутилизатора при $a = 1400$ мм.

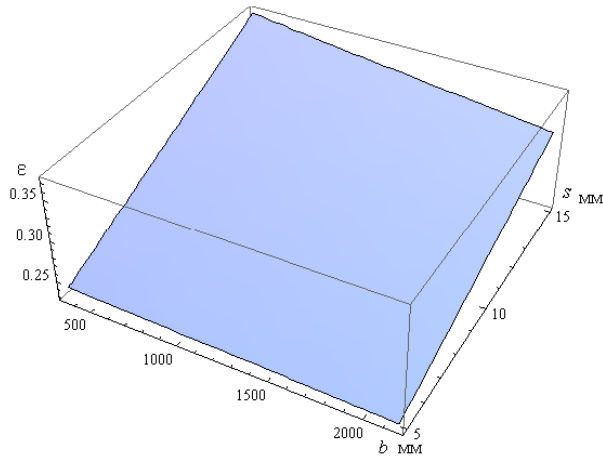


Рис. 1. Зависимость теплоэнергетического критерия эффективности ϵ от высоты пластины b и расстояния между пластинами s при $a = 1400$ мм

Для уравнений регрессии второго порядка имеются определенные трудности в геометрической интерпретации поверхности функций отклика, которые возрастают с увеличением числа факторов n . При $n > 2$ дать наглядное представление о геометрии такой поверхности невозможно. Но и при числе факторов $n = 2$ объемное изображение хотя и дает наглядное представление о геометрии поверхности функции отклика, тем не менее, не позволяет детально исследовать эту поверхность в области оптимума. При этом во всех случаях, если последовательно рассматривать изменение двух факторов при стабилизированных остальных, такое исследование возможно с помощью метода канонических преобразований, позволяющего получить графическую и аналитическую интерпретации области оптимума посредством серии контурных кривых на плоскости.

Детальное исследование поверхности функции отклика в области оптимума с помощью плоских контурных кривых необходимо для определения на основании точных значений оптимальных параметров теплообменной поверхности теплоутилизатора технологически обоснованных интервалов их изменения. Незначительное изменение функции отклика при изменении соответствующего параметра позволяет расширить интервал его изменения. В противном случае, интервал изменения сужается и возникает необходимость придерживаться точных значений оптимальных параметров при проектировании теплообменной поверхности теплоутилизатора.

Для уравнения регрессии второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j=1, i \neq j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (8)$$

каноническое преобразование представляет собой переход к уравнению:

$$Y - Y_s = \sum_{i=1}^n B_{ii} X_{ii}^2. \quad (9)$$

где X_j – канонические переменные;

Y_s – значение выходной переменной в центре факторного пространства, полученное при подстановке в уравнение регрессии координат нового центра.

При каноническом преобразовании уравнения регрессии второго порядка для двух факторов стандартное уравнение имеет вид:

$$Y - Y_s = B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2. \quad (10)$$

Для уравнения (10), в зависимости от знаков и значений B_{11} и B_{12} , возможна следующая классификация различных типов контурных кривых на плоскости для поверхности отклика в области оптимума при равных значениях параметра оптимизации (табл. 1).

1. Типы поверхностей отклика канонического уравнения второго порядка для двух переменных

№ п/п	Коэффициенты	Знаки коэф.		Тип кривых в сечении	Геометрическая интерпретация	Центр
		B_{11}	B_{22}			
1	$B_{11} = B_{22}$	-	-	Окружность	Круглая выпуклость	Максимум
2	$B_{11} = B_{22}$	+	+	Окружность	Круглая впадина	Минимум
3	$B_{11} > B_{22}$	-	-	Эллипс	Эллипсоидная выпуклость	Максимум
4	$B_{11} > B_{22}$	+	+	Эллипс	Эллипсоидная впадина	Минимум
5	$B_{11} = B_{22}$	+	-	Гипербола	Симметричное седло	Седловая точка
6	$B_{11} < B_{22}$	-	+	Гипербола	Симметричное седло	Седловая точка
7	$B_{11} < B_{22}$	+	-	Гипербола	Вытянутое седло	Седловая точка
8	$B_{22} = 0$	-	0	Прямая	Стационарный гребень	Нет
9	$B_{11} = 0$	-	0	Парабола	Возрастающий гребень	На бесконечности

Для исследуемого теплоутилизатора уравнения регрессии представляют собой уравнения второго порядка. При фиксировании оптимальном расстояния между пластинами $s = 5$ мм, зависимости теплоэнергетического критерия эффективности ε от ширины пластины a и высоты пластины b имеют следующий вид:

$$t_0 = -50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = 0,89 - 4,07 \cdot 10^{-4} a + 1,07 \cdot 10^{-7} a^2 - 3,98 \cdot 10^{-4} b + 1,38 \cdot 10^{-7} b^2 + 2,32 \cdot 10^{-8} ab,$$

$$t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = 0,58 - 3,54 \cdot 10^{-4}a + 1,19 \cdot 10^{-7}a_2 - 1,75 \cdot 10^{-5}b + 3,77 \cdot 10^{-9}b_2 + 2,43 \cdot 10^{-9}ab.$$

Для $t_0 = +50$ °С проведем исследование, учитывая кривизну поверхности, которой мы пренебрегли при использовании метода крутого восхождения Бокса-Уилсона, и сравним полученные результаты.

$$t_0 = +50 \text{ °С}$$

$$\varepsilon = 0,42 - 2,49 \cdot 10^{-4}a + 8,54 \cdot 10^{-8}a_2 - 7,90 \cdot 10^{-6}b + 3,61 \cdot 10^{-10}b_2 + 8,84 \cdot 10^{-10}ab.$$

В канонической форме:

$$t_0 = -50 \text{ °С}$$

$$\varepsilon - 2,73 \cdot 10^{-1} = 1,42 \cdot 10^{-7}a_2 + 1,04 \cdot 10^{-7}b_2,$$

$$t_0 = 0 \text{ °С}$$

$$\varepsilon - 3,03 \cdot 10^{-1} = 1,19 \cdot 10^{-7}a_2 + 3,79 \cdot 10^{-9}b_2,$$

$$t_0 = +50 \text{ °С}$$

$$\varepsilon - 2,12 \cdot 10^{-1} = 8,54 \cdot 10^{-8}a_2 + 3,37 \cdot 10^{-10}b_2.$$

В соответствии с приведенной выше классификацией, геометрической интерпретацией поверхности отклика в области оптимума во всех случаях является эллипсоидная впадина, в центре которой находится минимум, и контурными кривыми в области оптимума при различных значениях функции отклика являются эллипсы. На рис. 2–4 представлены графики указанных зависимостей и соответствующие контурные кривые для исследуемого воздухогрейного теплоутилизатора при различных значениях температуры окружающей среды. Контурные кривые поверхностей отклика построены для значений функций отклика, которые отличаются, в среднем, на 2%, 4% и 6% от значений функций отклика в точках минимума. Координаты центров контурных кривых являются оптимальными значениями параметров a и b . Значения этих координат и соответствующие им значения теплоэнергетического критерия следующие: при $t_0 = -50$ °С: $a=1770$ мм, $b=1290$ мм, $\varepsilon=0,270$; при $t_0 = 0$ °С: $a=1460$ мм, $b=1850$ мм, $\varepsilon=0,303$; при $t_0 = +50$ °С: $a=1410$ мм, $b=2000$ мм, $\varepsilon=0,330$. При температуре окружающей среды $t_0 = -50$ °С расстояния между контурными кривыми поверхности отклика в пределах указанного изменения функции отклика как и расстояния кривых от центра для параметров a и b практически равны.

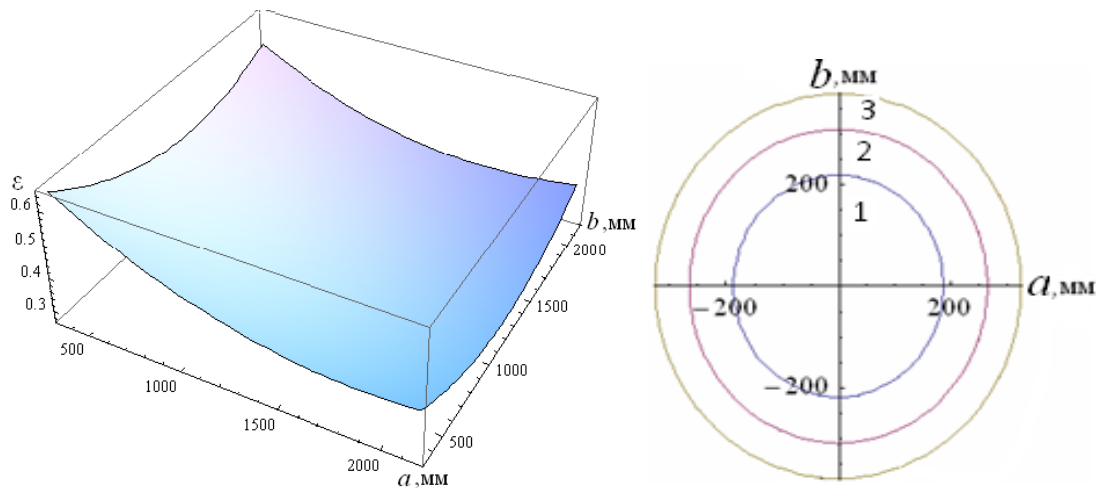


Рис. 2. Зависимость теплоэнергетического критерия ϵ от ширины пластины a и высоты b при $s = 5$ мм для $t_0 = -50$ °С; и контурные кривые в области оптимума: 1 – $\epsilon = 0,275$, 2 – $\epsilon = 0,280$, 3 – $\epsilon = 0,285$

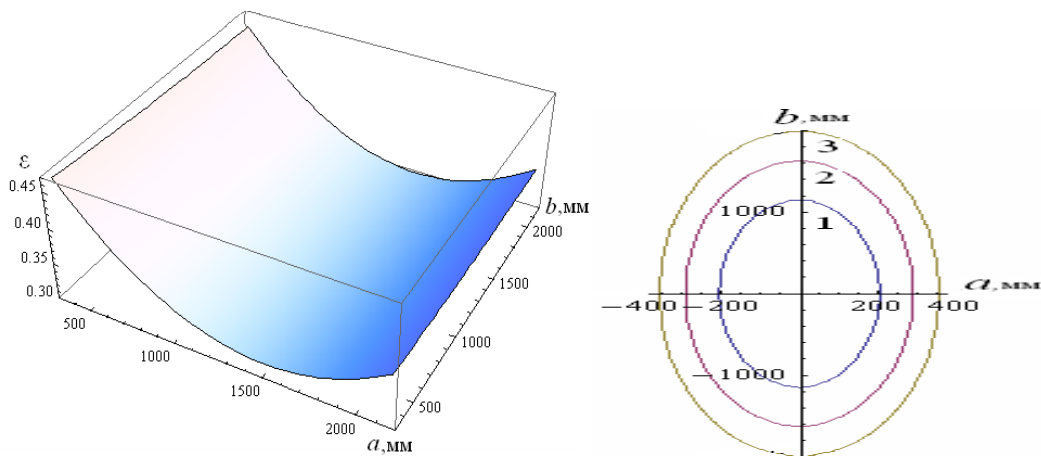


Рис. 3. Зависимость теплоэнергетического критерия ϵ от ширины пластины a и высоты b при $s = 5$ мм для $t_0 = 0$ °С; и контурные кривые в области оптимума: 1 – $\epsilon = 0,308$, 2 – $\epsilon = 0,313$, 3 – $\epsilon = 0,318$

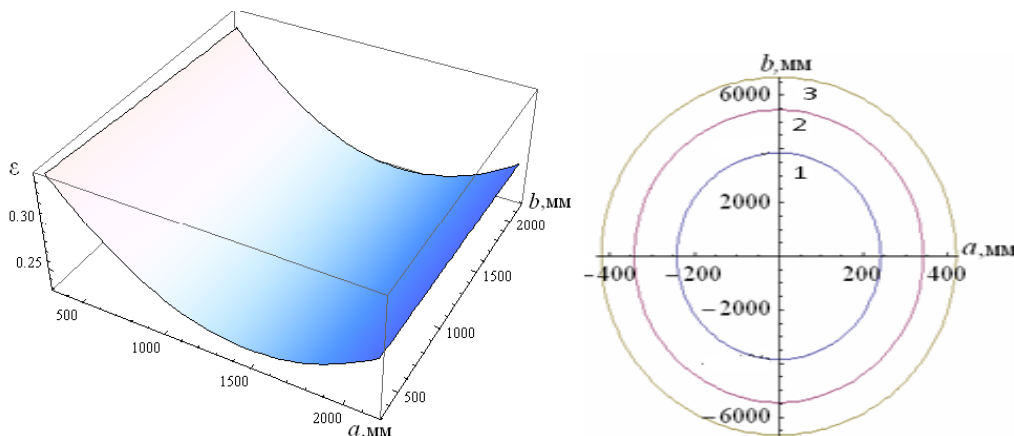


Рис. 4. Зависимость теплоэнергетического критерия ϵ от ширины пластины a и высоты b при $s = 5$ мм для $t_0 = +50$ °С; и контурные кривые в области оптимума: 1 – $\epsilon = 0,335$, 2 – $\epsilon = 0,340$, 3 – $\epsilon = 0,345$

Таким образом, технологически обоснованные интервалы их изменения могут быть одинаковыми. При значениях температуры окружающей среды $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_0 = +50 \text{ }^\circ\text{C}$ расстояния между контурными кривыми поверхности отклика в пределах указанного изменения функции отклика и расстояния кривых от центра для параметра a такие же, как и в случае $t_0 = -50 \text{ }^\circ\text{C}$, но для параметра b эти расстояния существенно больше. Это означает, что технологически обоснованные оптимальные интервалы изменения параметра b могут быть значительно расширены. В табл. 2 представлены результаты проведенных исследований. Результаты, полученные для $t_0 = +50 \text{ }^\circ\text{C}$ с использованием метода крутого восхождения Бокса-Уилсона, укладываются в найденные интервалы.

2. Оптимальные параметры воздухонагревателя

$t_0, \text{ }^\circ\text{C}$	$a, \text{ мм}$	$b, \text{ мм}$	$s, \text{ мм}$
-50	1650-1850	1200-1400	5-6
0	1350-1550	1500-2000	5-6
+50	1300-1500	1500-2000	5-6

Выводы

Проведен анализ алгоритмов оптимизации, применяемых в теории планирования эксперимента, метода крутого восхождения Бокса-Уилсона и метода канонических преобразований. Показана возможность использования указанных методов для оптимизации геометрических параметров теплообменной поверхности контактного пластинчатого воздухонагревателя, входящего в комбинированную теплоутилизационную систему котельной установки, предназначенную для подогрева воды и дутьевого воздуха.

С помощью статистических методов планирования эксперимента получены необходимые для оптимизации функциональные зависимости теплоэнергетического критерия эффективности от геометрических параметров теплообменной поверхности исследуемого воздухонагревателя.

На основе соответствующих алгоритмов оптимизации определены оптимальные интервалы изменения геометрических параметров теплообменной поверхности воздухонагревателя.

Список литературы

1. Термодинамическая оптимизация и анализ эффективности теплоутилизационных систем котельных агрегатов / Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Г. А. Пресич [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 98–102.
2. Термодинамическая оптимизация и анализ эффективности теплоутилизационных систем котельных агрегатов / Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Г. А. Пресич [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 98–102.
3. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М. : Наука, 1971. – 207 с.

4. Налимов В. В. Логические основания планирования эксперимента / Т. И. Голикова. – М. : Металлургия, 1981. – 151 с.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОБМІННОЇ ПОВЕРХНІ ПЛАСТИНЧАТОГО ПОВІТРОПІДІГРІВАЧА КОМБІНОВАНОЇ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

А. І. Степанова

Анотація. *Викладено результати оптимізації геометричних параметрів теплообмінної поверхні контактної пластинчатого повітропідігрівача комбінованої теплоутилізаційної системи котельної установки, призначеної для підігрівання води та дуттьового повітря за різних значень температури навколишнього середовища. Проаналізовано алгоритми оптимізації, що використовуються в теорії планування експерименту, і показано можливість їх застосування для оптимізації зазначених параметрів.*

Ключові слова: *ефективність, оптимізація, теплоутилізаційна система*

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF HEAT EXCHANGE SURFACE CONTACT PLATE AIR HEATER COMBINED SYSTEM HEAT RECOVERY BOILER PLANT

A. Stepanova

Annotation. *The results of optimization of geometrical parameters of heat exchange surface of the contact plate air heater combined heat recovery system boiler plant for heating water and blow air at different ambient temperatures. We analyzed the optimization algorithms used in the theory of design of experiments, and the possibility of their use to optimize these parameters.*

Key words: *efficiency, optimization, thermoutilyzing boiler system*