

УДК 621.181

ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В ТОПКАХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ПРИ
СЖИГАНИИ МАЗУТА
HEAT FLOWS IN FURNACES OF STEAM BOILERS DURING FUEL
COMBUSTION

Г.В. Алимов, П.А. Болбас, А.Д. Яковенко

Научный руководитель – Н.Б. Карницкий, д.т.н., профессор
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

G. Alimov, P. Bolbas, A. Yakovenko

Supervisor – N. Karnitsky, Doctor of technical sciences, Professor
Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: в статье рассматриваются тепловые потоки в топках паровых котлов при сжигании мазута.

Abstract: the article deals with heat flows in the furnaces of steam boilers during the combustion of fuel oil.

Ключевые слова: паровой котёл, топливо, топка, мазут.

Keywords: steam boiler, fuel, furnace, fuel oil.

Введение

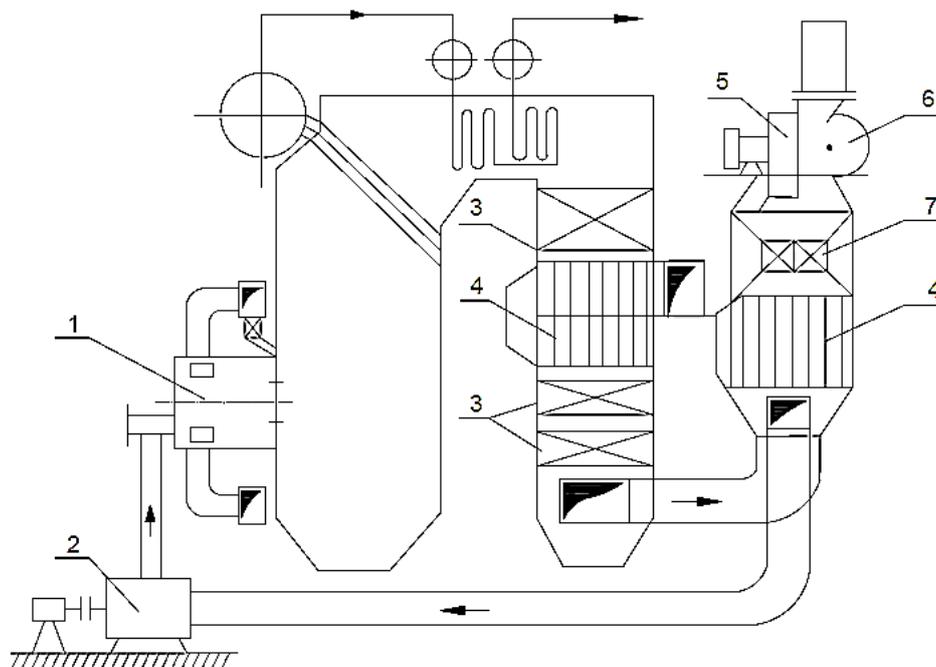
В качестве объекта исследования – стал паровой котел среднего давления производительностью 25 кг/с горизонтальными циклонными предтопками.

Основные расчетные параметры котла:

- производительность – 25 кг/с;
- давление перегретого пара – 3,68 МПа;
- температура перегретого пара – 713 К (440°C).

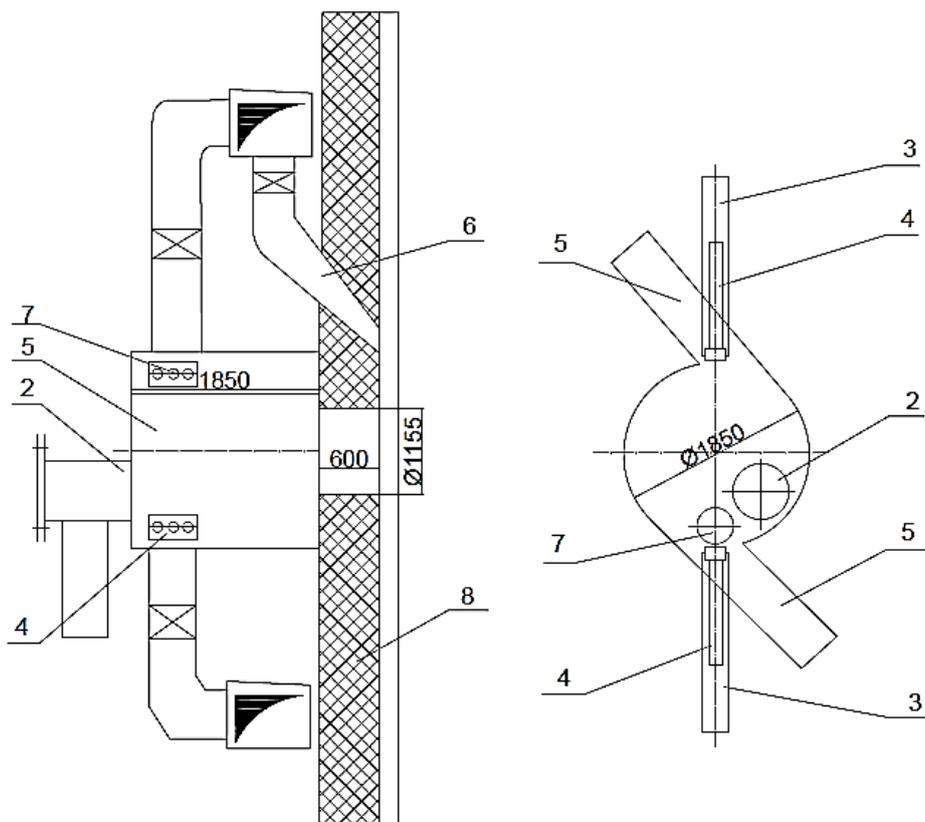
Основная часть

С целью повышения надежности и экономичности работы котлоагрегата восемь турбулентных комбинированных горелок заменены двумя газомазутными циклонами. Схема реконструированной котельной установки изображена на рис. 1. Два газомазутных циклона единичной производительностью по мазуту 0,974 кг/с установлены на фронтальной стене топки на отметке 8,5 м. Циклоны экранируются трубами диаметром 32 x 6 мм из стали 12Х1МФ, частично трубами такого же диаметра из стали 20. Внутренний диаметр циклона $D_{ц} = 1,85$ м, отношения длины и сопла циклона к диаметру: $L_{ц}/D_{ц} = 1$ м, $d_{с}/D_{ц} = 0,575$. Схема установки циклона и подвода воздуха, мазута, природного газа и газов рециркуляции представлена на рисунке 2.



1 – циклонный предтопок; 2 – дымосос рециркуляции; 3 – водяной экономайзер;
4 – трубчатый воздухоподогреватель; 5 – дутьевой вентилятор; 6 – основной дымосос котла;
7 – калориферная установка

Рисунок 1 – Схема котла среднего давления с циклонными предтопками



1 – камера циклонного предтопка; 2 – газоход рециркуляции; 3 – газовые сопла; 4 – мазутные форсунки; 5 – воздушное сопло; 6 – сопло вторичного воздуха; 7 – лючок для ввода запальника; 8 – фронтальная стена топки

Рисунок 2 – Схема установки циклонного предтопка и подводов воздуха, мазута, природного газа и газов рециркуляции

Была предложена методика планирования экспериментов по определению падающих тепловых потоков и обработки полученных результатов. Сложность и трудоемкость исследования процессов теплообмена вызваны многочисленностью влияющих факторов. Традиционные методики исследования основываются на поочередном варьировании отдельных независимых переменных при сохранении постоянства других. В этом случае даже значительное увеличение числа учитываемых факторов не дает реальной возможности достаточно полного изучения объекта исследования и получения достоверной математической модели для описания исследуемого явления. Проведение исследований с применением математических методов планирования и анализа эксперимента позволяет повысить качество эксперимента [1].

Метод планирования эксперимента, в частности регрессионный, служит для нахождения по результатам эксперимента связи выходной характеристики процесса с факторами, которые влияют на неё. Задача состоит в том, чтобы выявить, какие внешние и внутренние факторы оказывают существенное влияние на процесс, какова степень этого влияния. На процесс формирования тепловых потоков оказывают влияние ряд факторов, такие как, нагрузка котла, коэффициент избытка воздуха, степень рециркуляции дымовых газов, расположение горелочных устройств, доля вторичного воздуха и т.п.

Поскольку каждый из этих факторов по-разному воздействует на величину тепловых потоков, необходимо выбрать определяющие факторы. В связи с тем, что распределение тепловых потоков как по высоте, так и по ширине топки нелинейно, использована модель второго порядка, при этом функция цели аппроксимируется полиномом второго порядка.

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

В период наладочных опытов было установлено, что доля вторичного воздуха при характерных нагрузках котла с циклонными предтопками не оказывает существенного влияния на величину падающих тепловых потоков, поэтому этот фактор был отброшен как несущественный. Таким фактором, как расположение горелочных устройств невозможно варьировать, поэтому он принимается постоянным и в уравнении не вводится.

В итоге, после проведенного анализа значимости факторов для исследования поверхности отклика получена функция четырех переменных.

$$y = q_{\text{пад}} = f_1(D_{\text{пе}}, \alpha''_{\text{пп}}, \bar{H}, r) \quad (2)$$

Зависимость использовалась для получения аналитической зависимости по определению тепловых потоков по высоте топки при циклонном сжигании газа и мазута на котле среднего давления. Диапазон изменения факторов в уравнении устанавливался исходя из следующих соображений. Известно, что нагрузка котла может изменяться от минимально допустимой (по условиям циркуляции) до максимальной, т.е. в данном случае от 17,6 до 25 кг/с. Коэффициент избытка воздуха может изменяться от критического до максимального, значение которого ограничено экономическими соображениями. При сжигании мазута

предел варьирования коэффициент избытка воздуха составлял 1,05...1,15, для природного газа – 1,03...1,15.

Относительная высота топки \bar{H} может изменяться от 0 до 1, но из практических соображений пределы выравнивания выбраны 0,48 до 1,0 (рисунок 3). Степень рециркуляции дымовых газов в циклонные предтопки выбирались прежде всего по условиям снижения выбросов оксидов азота, поэтому диапазон изменения γ выбран от 1,7 до 17,1%. Окончательные итоги сведены в таблице 1 для случая циклонного сжигания мазута и в таблице 2. при сжигании природного газа.

Схема расположения измерительных лючков приведена на рисунке 3.

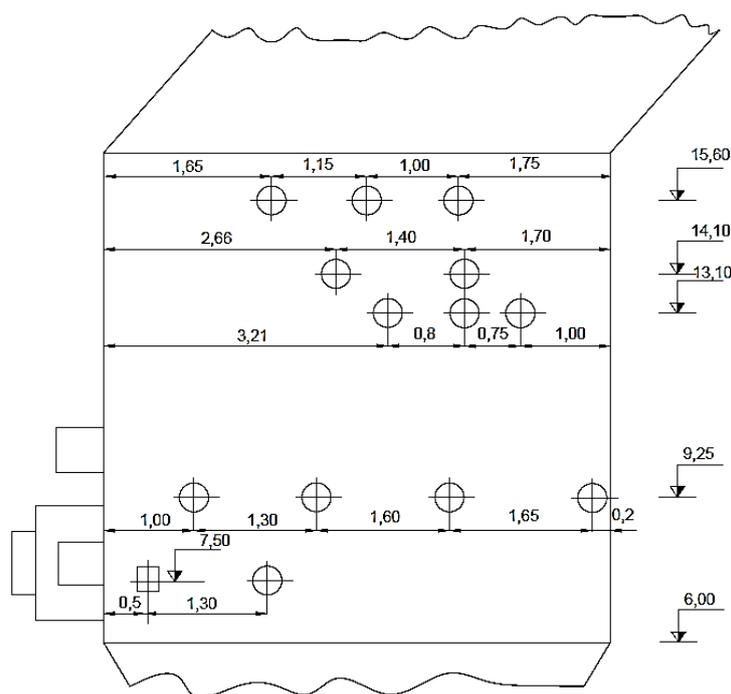


Рисунок 3 – Схема расположения измерительных лючков на правой боковой стене топочной камеры парового котла среднего давления производительностью 25 кг/с ($H_T = 15,60$ м)

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов при циклонном сжигании мазута

Уровни	Факторы			
	$x_1 - D_{пе},$ кг/с	$x_2 - \alpha''_{пп}$	$x_3 - \bar{H}$	$x_4 - \gamma,$ %
-1	17,6	1,05	0,48	1,7
0	21,3	1,1	0,74	9,4
1	25,0	1,15	1,00	17,1

Таблица 2 – Уровни варьирования факторов при циклонном сжигании газа

Уровни	Факторы			
	$x_1 - D_{пе},$ кг/с	$x_2 - \alpha''_{пп}$	$x_3 - \bar{H}$	$x_4 - \gamma,$ %
-1	17,6	1,03	0,48	1,7
0	21,3	1,09	0,74	9,4
1	25,0	1,15	1,00	17,1

$$y = q_{\text{пад}} = f_2(q_V, \alpha''_{\text{пп}}, \bar{H}) \quad (3)$$

Выбор плана эксперимента производился из соображений обеспечения высокой точности в оценке коэффициентов регрессии при незначительном числе опытов.

Для планирования эксперимента на четырех уровнях пользовался план B_4 , который близок к непрерывному D-оптимальному плану по величине определителя информационной матрицы, средней дисперсии, но превосходит последний по значению максимальной дисперсии. Если учесть, что число точек плана составляет $N = 24$ против 72 D-оптимального плана, то понятно преимущество плана B_4 [2].

Обработка планов и экспериментальных зависимостей произведена методом наименьших квадратов (МНК) по типовым программам.

Адекватность принятых регрессионных моделей проверялась с помощью критерия Фишера. Значимость коэффициентов уравнений регенерации определялась по критерию Стьюдента. Однородность дисперсий проверялась по критерию Кохрена [3].

Переход от кодированных факторов к натуральным величинам осуществлялась с использованием зависимости [4].

$$x_i = \frac{C_i - C_{oi}}{\Delta C_i}, \quad (5)$$

где: x_i – кодированная переменная;

C_i – натуральное значение фактора;

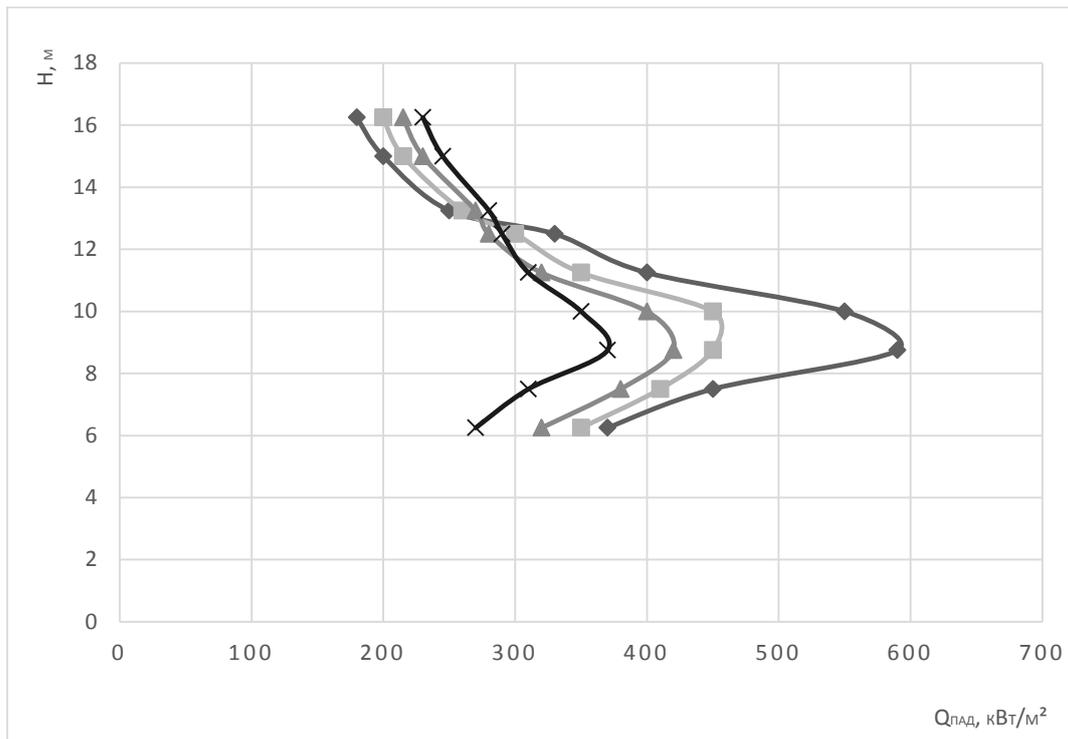
C_{oi} – натуральное значение основного уровня;

ΔC_i – интервал варьирования.

В результате проведенных измерений построены графики распределения подающих тепловых потоков по высоте и глубине топки на нагрузке котла, равной 23,61 кг/с (рисунки 4, 5).

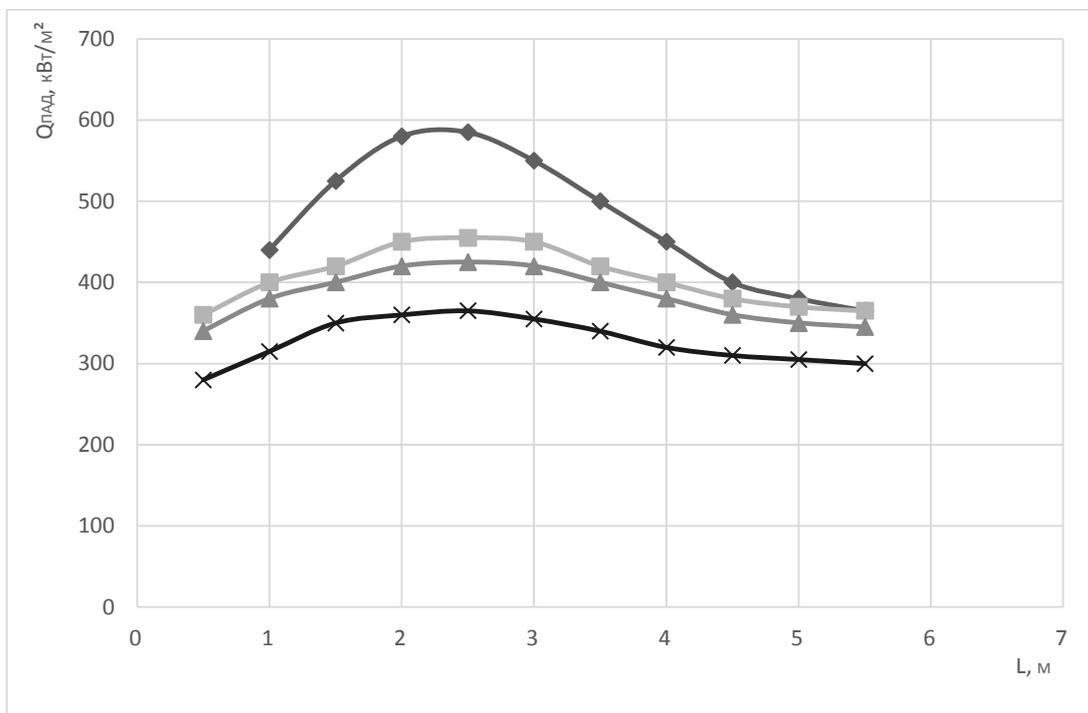
На них приведены данные котла с горелками (до реконструкции) и с циклонными предтопками (после реконструкции).

Для получения расчетной зависимости величины падающих тепловых потоков от нескольких факторов использован метод планирования эксперимента с применением плана B_4 . Матрица плана и обработка данных приведена в таблице 3. В результате получено уравнение регрессии, которое позволяет рассчитывать $q_{\text{под}}$ в зависимости от нагрузки, коэффициента избытка воздуха, степени рециркуляции и относительной высоты топки, существенно сократив число экспериментов.



1 – горелочный способ сжигания ($\alpha''_{пп} = 1,02$), 2 – циклонный способ сжигания при отключенной рециркуляции ($\alpha''_{пп} = 1,07$), 3 и 4 – циклонный способ сжигания при степени рециркуляции дымовых газов 8% и 17% соответственно ($\alpha''_{пп} = 1,07$)

Рисунок 4 – Распределение падающих тепловых потоков по высоте топки при сжигании мазута. Нагрузка котла – 23,61 кг/с.



1 – горелочный способ сжигания ($\alpha''_{пп} = 1,02$), 2 – циклонный способ сжигания при отключенной рециркуляции ($\alpha''_{пп} = 1,07$), 3 и 4 – циклонный способ сжигания при степени рециркуляции дымовых газов 8% и 17% соответственно ($\alpha''_{пп} = 1,07$)

Рисунок 5 – Распределение падающих тепловых потоков по ширине правой боковой стены топки (отметка 9,25 м) при сжигании мазута. Нагрузка котла – 23,61 кг/с.

Таблица 3 – Сводная таблица результатов обработки плана эксперимента В₄ для получения зависимости вида $y = q_{пад} = f_1(D_{пе}, \alpha''_{пп}, \bar{H}, r)$ при циклонном сжигании мазута

		Факторы i = 1, 2, 3, 4 p=4				Уравнение регрессии в кодированных переменных $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4$																			
		D _{пе} , кг/с	α'' _{пп}	H	r, %																				
Основной уровень		21,3	1,1	0,74	9,4																				
Интервал варьирования		3,7	0,05	0,26	7,7																				
Верхний уровень		25,0	1,15	1,0	17,1																				
Нижний уровень		17,6	1,05	0,48	1,7																				
Планирование j = 1, 2, 3, ... N, N=24																									
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	0	0	0	0	0	0	
	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	0	0	+	-	0	0	0	0	
	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	0	0	0	0	+	-	0	0	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	0	0	0	0	0	0	+	-	
	255	360	220	230	250	200	190	180	420	410	250	255	390	280	285	280	410	345	215	355	170	220	300	245	
Рабочая матрица																									
Опыты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
D _{пе} , кг/с	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	
α'' _{пп}	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	
H	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	
r, %	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	
Опыты	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
D _{пе} , кг/с	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	
α'' _{пп}	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	
H	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	
r, %	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	1,7	17,1	
Уравнение регрессии в натуральных переменных $q_{пад} = 82D_{пе} - 1,8D_{пе}^2 - 30708\alpha''_{пп} + 14120\alpha''_{пп}^2 + 307H - 290H^2 + 6,10Hr - 4,5r + 15988$, кВт/м ²																									

$$\hat{y} = 297 + 18,3x_1 + 17,8x_2 - 16,9x_3 - 24,7x_1^2 + 35,9x_2^2 - 19,7x_3^2 + 12,2x_3x_4. \quad (6)$$

Заключение

При горелочном варианте исполнения наблюдается резко-неравномерное распределение тепловых потоков. В то же время циклонный способ сжигания мазута позволяет улучшить условия обогрева экранных поверхностей нагрева, что видно на распределении падающих тепловых потоков, которое стало более равномерным.

Получено распределение по ширине правой боковой топки на отметке 15,6 м, которое показало еще одно преимущество циклонного сжигания мазута. Как отмечалось ранее, до реконструкции котла перегрев пара не всегда выдерживался. Уровень падающих тепловых потоков на выходе из топки при циклонном сжигании выше в сравнении с горелочным и, как следствие, перегрев пара стал выдерживаться.

Литература

1. Экспериментальные работы на парогенераторах / А.К. Внуков. – Москва: Издательство Энергия, 1971. – 196 с.
2. Каталог планов второго порядка, Ч. 1 / Т.И. Голиков, Л.А. Панченко, М.З. Фридман. – Москва: Издательство МГУ, 1974. – 388 с.
3. Планирование и анализ эксперимента / В.Б. Тихомиров. – Москва: Издательство Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
4. Применение Теории вероятностей и математической статистики в теплофизических исследованиях / А.Г. Илларионов, В.Я. Сасин. – Москва: Издательство МЭИ, 1980. – 94 с.