

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК КОТЛОВ В ВОДОГРЕЙНОЙ КОТЕЛЬНОЙ

Докт. техн. наук БАЙРАШЕВСКИЙ Б. А.,  
БОРУШКО Н. П.

РУП «БелТЭИ»

Оптимизация режима работы водогрейной котельной сводится в основном к решению задачи по унификации ее тепловой схемы как фундамента для организации оптимального распределения нагрузок  $Q_i$  между  $i$ -ми котлами в количестве, равном  $j$ . Это позволяет в широком масштабе реализовать актуальные тенденции к повышению ее надежности и экономичности, включая котлы. В отношении последних, исходя из опыта эксплуатации, основные тенденции к повышению эффективности их работы можно сформулировать так:

- нагрузка котла должна быть как можно большей;
- температура уходящих газов должна быть как можно меньшей;
- температура воды на входе в котел должна быть как можно большей;
- разрыв между температурами воды в прямой магистрали теплосети и на выходе из котла должен быть как можно меньшим;
- минимальная температура труб конвективного пучка должна быть выше температуры точки росы на 5–7 °С.

Очевидно, что некоторые из приведенных принципов в какой-то мере противоречат друг другу. Именно это обстоятельство и учитывается в основе их оптимизации путем введения мероприятий режимного характера и усовершенствования конструкции котлов в целом.

Оптимизация работы котлов в базовом режиме сводится к минимизации топливных затрат котельной и расчету массовых и тепловых потоков по трубопроводам в ее пределах для контроля за соблюдением определенных ограничений. В частности, имеется в виду, что температура воды на входе в котел определяется минимально допустимым значением температуры уходящих газов, отвечающих условиям надежности работы и защиты его поверхностей нагрева от низкотемпературной коррозии. Рабочая температура воды на выходе из каждого  $i$ -го котла  $t_{к2i}^p = t_{т1i}^p + Q_i / (CG_{кти})$  должна быть ограничена условиями работы теплосети:

$$t_c \leq t_{к2i}^{\min} \leq t_{к2i}^p \leq t_{к2i}^{\text{пред}}; \quad (1)$$

$$t_o \leq t_{т1i}^{\text{доп}} \leq t_{т1i}^p = t_{к2i}^p - Q_i / (CG_{кти}), \quad (2)$$

где  $t_c$ ,  $t_o$  – температура прямой и обратной воды в теплосети;  $t_{к2i}^{\min}$  – минимально возможная в данных условиях температура воды на выходе из котла;  $t_{к2i}^{\text{пред}}$  – предельно максимальная температура нагрева воды в котле, отвечающая его паспортным данным;  $t_{т1i}^{\text{доп}}$  – минимально допустимая тем-

пература воды на входе в котел по условиям низкотемпературной коррозии;  $C$ ,  $G_{\text{тки}}$  – удельная теплоемкость и массовый расход воды, циркулирующей в каждом  $i$ -м котле.

При заданной тепловой нагрузке котельной ( $Q_{\text{кт}} = \sum Q_i$ ) минимизацию топливных затрат, в частности среднего удельного расхода топлива по котельной, проще всего контролировать на основании формулы

$$b = \sum_{i=1}^j (Q_i b_i) \left( \sum_{i=1}^j Q_i \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $b_i = \eta_i^{-1} Q_y^{-1}$  – удельный расход топлива;  $\eta_i^{-1}$  – КПД брутто котла;  $Q_y$  – теплота сгорания условного топлива.

В соответствии с этим расчетный показатель  $b$  по котельной в целом на основании формулы (3) выразим так

$$b Q_{\text{кт}} Q_y = \sum_{i=1}^j (Q_i \eta_i^{-1}). \quad (4)$$

Значения  $Q_{\text{кт}}$  и  $Q_y$  в (4) являются постоянными. Следовательно, контроль за оптимизацией нагрузок котлов в котельной можно выполнять на основании двух показателей в (4), доступных к измерениям в условиях эксплуатации, т. е.  $Q_i$  и  $\eta_i$ . Для выявления определения минимума функции (4) определим систему уравнений частных производных:  $\partial b / \partial Q_1 = 0$ ,  $\partial b / \partial Q_2 = 0$ , ...,  $\partial b / \partial Q_j = 0$ , а именно:

$$\eta_1^{-1} \frac{\partial Q_1}{\partial Q_1} - \eta_1^{-2} Q_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial Q_1} + \eta_2^{-1} \frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} - \eta_2^{-2} Q_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial Q_1} + \dots + \eta_j^{-1} \frac{\partial Q_j}{\partial Q_1} - \eta_j^{-2} Q_j \frac{\partial \eta_j}{\partial Q_1} = 0;$$

$$\eta_1^{-1} \frac{\partial Q_1}{\partial Q_2} - \eta_1^{-2} Q_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial Q_2} + \eta_2^{-1} \frac{\partial Q_2}{\partial Q_2} - \eta_2^{-2} Q_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial Q_2} + \dots + \eta_j^{-1} \frac{\partial Q_j}{\partial Q_2} - \eta_j^{-2} Q_j \frac{\partial \eta_j}{\partial Q_2} = 0;$$

.....

$$\eta_1^{-1} \frac{\partial Q_1}{\partial Q_j} - \eta_1^{-2} Q_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial Q_j} + \eta_2^{-1} \frac{\partial Q_2}{\partial Q_j} - \eta_2^{-2} Q_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial Q_j} + \dots + \eta_j^{-1} \frac{\partial Q_j}{\partial Q_j} - \eta_j^{-2} Q_j \frac{\partial \eta_j}{\partial Q_j} = 0,$$

в которой по условиям оптимизации показатели изменения нагрузок котлов имеют разные знаки, т. е. в отличие от производных  $\partial Q_1 / \partial Q_1 = 1$ , ...,  $\partial Q_j / \partial Q_j = 1$  и т. д., частные производные  $\partial Q_2 / \partial Q_1 = -1$ ,  $\partial Q_3 / \partial Q_1 = -1$ , ...,  $\partial Q_j / \partial Q_1 = -1$ ,  $\partial Q_j / \partial Q_2 = -1$  и т. д. В соответствии с этим там же:  $\partial \eta_1 / \partial Q_2 = \partial \eta_1 / \partial Q_3 = \dots = \partial \eta_1 / \partial Q_j = -\partial \eta_1 / \partial Q_1$ ;  $\partial \eta_2 / \partial Q_3 = \partial \eta_2 / \partial Q_1 = \dots = \partial \eta_2 / \partial Q_j = -\partial \eta_2 / \partial Q_2$ ;  $\partial \eta_j / \partial Q_2 = \partial \eta_j / \partial Q_3 = \dots = -\partial \eta_j / \partial Q_j$ .

Тогда на основании обобщения приведенных формул общий вид одного из таких уравнений, составляющих систему, для каждого  $i$ -го котла запишем следующим образом [1]:

$$Q_{\text{кт}} Q_y \frac{\partial b}{\partial Q_i} = \frac{2}{\eta_i} \left( 1 - \frac{Q_i}{\eta_i} \frac{\partial \eta_i}{\partial Q_i} \right) - \bar{\epsilon} = 0, \quad (5)$$

где

$$\bar{\epsilon} = \sum_{i=1}^j \frac{1}{\eta_i} - \sum_{i=1}^j \left( \frac{Q_i}{\eta_i^2} \frac{\partial \eta_i}{\partial Q_i} \right). \quad (6)$$

КПД брутто котла  $\eta_i$  и его изменение  $\partial \eta_i / \partial Q_i$  по мере оптимизации нагрузок в котельной согласно (5), (6) определяются разными методами. Рассмотрим два из них: 1-й метод основан на аппроксимации функции  $\eta_i = f(Q_i)$ , 2-й – на результатах анализа полуэмпирической формулы Я. П. Пекера [2] по расчету балансовых потерь  $q_2$  с уходящими газами.

По 1-му методу аппроксимационную функцию  $\eta_i = f(Q_i)$ , входящую в систему (5), (6), выразим в виде полинома либо в виде прямой, что в диапазоне нагрузок от 40 до 100 % с небольшой погрешностью запишем:

$$\eta_i = a_i Q_i Q_{\text{нi}}^{-1} + C_i; \quad (7)$$

$$C_i = B_i + C_{\text{нi}}(t_{\text{нi}} - t_{\text{нои}}) + C_{\text{тli}}(t_{\text{тli}} - t_{\text{тloi}}). \quad (8)$$

Здесь  $Q_{\text{нi}}$  – номинальная нагрузка котла;  $a_i$ ,  $B_i$  – коэффициенты аппроксимации, установленные по исходно-нормативным характеристикам котла при значениях температур воздуха  $t_{\text{нои}}$ , подаваемого на горение, и воды на входе в котел  $t_{\text{тloi}}$ . Поправки на фактические значения этих температур, т. е. воздуха  $t_{\text{нi}}$  и воды  $t_{\text{тli}}$ , вводятся в (8) с помощью эмпирических коэффициентов  $C_{\text{нi}}$  и  $C_{\text{тli}}$ .

Применительно к двум котлам согласно (5) и (7) имеем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 2\eta_1^{-1}(1 - \eta_1^{-1} a_1 Q_1 Q_{\text{н1}}^{-1}) - \bar{\epsilon} &= 0; \\ 2\eta_2^{-1}(1 - \eta_2^{-1} a_2 Q_2 Q_{\text{н2}}^{-1}) - \bar{\epsilon} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В результате решения системы (9) относительно аргумента  $Q_i$  с учетом (7) и (8) при  $i = 1$  и  $i = 2$ , а также имея в виду, что  $Q_{\text{кт}} = Q_1 + Q_2$ , определяем расчетные формулы по выявлению оптимальных нагрузок  $Q_1 = Q_1^{\text{опт}}$  и  $Q_2 = Q_2^{\text{опт}}$  между двумя котлами, а именно:

$$\left. \begin{aligned} Q_1^{\text{опт}} &= -0,5\beta/\alpha + \left[ 0,5(\beta/\alpha)^2 - \gamma/\alpha \right]^{0,5}; \\ Q_2^{\text{опт}} &= Q_{\text{кт}} - Q_1^{\text{опт}}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где при  $i = 1$  и  $i = 2$ , обозначив  $A_i = a_i Q_{\text{нi}}^{-1}$ ,

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= A_2^2 C_1 - A_1^2 C_2; \\ \beta &= -2C_1[A_2(Q_{\text{КТ}} A_2 + C_2) + A_1 C_2]; \\ \gamma &= C_1[Q_{\text{КТ}} A_2(Q_{\text{КТ}} A_2 + 2C_2) + C_2(C_2 - C_1)]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

В табл. 1 и 2 даны выкопировки из рабочего листа программного файла «ОПТВ1», позволяющего оптимизировать тепловые нагрузки водогрейных котлов, работающих в котельной на одну сеть.

Таблица 1

Оптимизация тепловых нагрузок в котельной с двумя котлами

ОПТВ1		Оптимизация суммарных $\Sigma Q_{j=1-j} = 140$ Гкал/ч = 162,8 МВт									
2.Решение задачи		тепловых нагрузок двух водогрейных котлов									
1.Решение задачи		Сохр. мод. 2А		Восст. мод. 2А		Сохр. мод. 2Б		Восст. мод. 2Б			
j = 2		Принципиальное решение задачи основано на системе уравнений: $\phi - \delta = 0$ .									
«ин» – исходно-нормативные данные; «ф» и «опт» – показатели до и после оптимизации.											
$\Sigma \eta_i^{-1} =$	1/%	ф	0,022			$\Sigma K_i =$	1/%	ф	0,00		
	1/%	опт	0,022				1/%	опт	0,00		
										$\delta =$	
										1/% ф 0,02	
										1/% опт 0,02	
Обозн.	Разм.	Обозн.	$i_1$	$i_2$	$\Sigma P_{\text{КОТ}}$	<p>По котельной: <math>\Sigma Q_{j=1-j} = Q = Q_1 + Q_2 = Q_1^{\text{опт}} + Q_2^{\text{опт}}</math>;  <math>\phi - \delta = 0</math>, где <math>\delta = \Sigma \eta_i^{-1} - \Sigma K_i</math>; <math>K_i = a_i Q_i \eta_i^{-2} Q_{\text{ни}}^{-1}</math>; <math>\delta = \Sigma \eta_i^{-1} - \Sigma K_i</math>; <math>K_i = a_i Q_i \eta_i^{-2} Q_{\text{ни}}^{-1}</math>; <math>\phi = 2\eta_i^{-1}(1 - a_i Q_i \eta_i^{-1} Q_{\text{ни}}^{-1})</math>;  <math>\eta_i = a_i Q_i / Q_{\text{ни}} + C_i</math>; <math>C_i = b_i + C_{\text{ил}}(t_{\text{ни}} - t_{\text{н0и}}) + C_{\text{т1и}}(t_{\text{т1и}} - t_{\text{т10и}})</math>.  <math>\delta_i = 100^{\circ}(\phi - \delta) / \delta</math>.</p> <p>1-й и наиболее рациональный способ решения задачи основан на определении минимума функции <math>b = (\Sigma b_i Q_i) / \Sigma Q_i</math> с помощью оператора «Поиск решения» при определенных граничных условиях.</p> <p>2-й способ решения – на основании квадратного уравнения относительно <math>Q_i^{\text{опт}}</math>: <math>\alpha (Q_1^{\text{опт}})^2 + \beta Q_1^{\text{опт}} + \gamma = 0</math>, где <math>\alpha = A_2^2 C_1 - A_1^2 C_2</math>. <math>A_1 = -0,015</math> <math>A_2 = -0,052</math>  <math>\beta = -2 C_1 [A_1 C_2 + A_2 (A_2 Q + C_2)]</math>; <math>\gamma = C_1 [A_2 Q (A_2 Q + 2C_2) + (C_2 - C_1)]</math>; <math>Q_1^{\text{опт}} = -0,5 \beta \alpha^{-1} + [0,25 \beta^2 \alpha^{-2} - \gamma \alpha^{-1}]^{0,5}</math>  <math>\alpha = 0,23</math> Соответственно: <math>Q_2^{\text{опт}} = Q - Q_1^{\text{опт}}</math>.</p> <p><math>\beta = 1104</math> <math>Q_1^{\text{опт}} = 87,2</math> Гкал/ч <math>Q_2^{\text{опт}} = 52,8</math> Гкал/ч  <math>\gamma = -97944</math> <math>101,4</math> МВт <math>61,42</math> МВт</p>					
$Q_i^{\text{MAX}}$	Гкал/ч	ин	100,0	100,0	По котельной в целом						
$Q_{\text{ни}}$	Гкал/ч	ин	90,0	90,0							
$G_{\text{КТ}}$	т/ч	ин	1200	1300							
$a_i$	%	ин	-1,32	-4,64							
$b_i$	%	ин	93,9	96,64							
$C_{\text{ни}}$	%/°С	ин	0,043	0,044							
$t_{\text{ни}}$	°С	ф	-15,0	-15,0							
$t_{\text{н0и}}$	°С	ин	15,0	15,0							
$C_{\text{т1и}}$	%/°С	ин	-0,041	-0,040							
$t_{\text{т1и}}$	°С	ф	68,0	65,0							
$t_{\text{т10и}}$	°С	ин	70,0	70,0							
$C_i$	%	ф	92,69	95,52							
$\phi_i$	1/%	ф	0,022	0,023							
		опт	0,022	0,022							
$K_i$	1/%	ф	0,00	0,00							
		опт	0,00	0,00							
$\delta_i$	%	ф	-1,23	1,23							
		опт	0,00	0,00							
$Q_i$	Гкал/ч	ф	70,0	70,0	По котельной в целом						
		опт	87,2	52,8							
$t_{\text{к2i}}$	°С	ф	126,3	118,8							
		опт	140,7	105,6							
$\eta_i$	%	ф	91,67	91,91							
		опт	91,41	92,8							
$b_i$	кг/Гкал	ф	155,8	155,4							
		опт	156,3	153,9							
$B_i$	т/ч	ф	10,9	10,9							
		опт	13,6	8,1							
						$\Delta = 100(B_{\text{ф}} - B_{\text{опт}}) / B_{\text{ф}} = 0,15 \%$					
						$\Delta t_{\text{к2}} = t_{\text{к2}}^{\text{ф}} - t_{\text{к2}}^{\text{опт}} = -4,85 \text{ } ^\circ\text{C}$					
						$\Delta \eta = \eta_{\text{ф}} - \eta_{\text{опт}} = -0,14 \%$					
					$\Delta b = b_{\text{ф}} - b_{\text{опт}} = 0,24 \text{ кг/Гкал}$						
					$\Delta B = B_{\text{ф}} - B_{\text{опт}} = 0,034 \text{ т/ч}$						
<p>В целом по котельной: отклонение (<math>\Delta P_{\text{КОТ}}</math>) фактич. показат. до оптимизации от оптимальных</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ:  В случае оптимизации нагрузок котлов с одинаковыми (по коэффициентам) нормативными характеристиками решение задачи обоими способами не имеет смысла.</p>											

В табл. 1 приведены результаты оптимизации нагрузок между двумя котлами ( $Q_1 = Q_1^{\text{опт}} = 87,2$  Гкал/ч и  $Q_2 = Q_2^{\text{опт}} = 52,8$  Гкал/ч), полученные двумя способами. 1-й способ основан на определении минимального значения удельного расхода топлива в среднем по котельной, вычисляемого по формуле (3). Для этого используется соответствующая операционная

система компьютера по отысканию минимума исследуемой функции при определенных ограничениях значений расчетных показателей  $Q_1$  и  $Q_2$ . 2-й способ – путем непосредственных расчетов по (10), (11). Как видно, результаты решения обоими способами оптимизации совпадают. В случае оптимизации котельной с тремя-пятью и более котлами 2-й способ аналитического решения задачи значительно усложняется, так как приводит к уравнениям 3–5-й степеней относительно аргумента  $Q_1$  соответственно. Поэтому при числе котлов в котельной  $j > 2$  в программном файле «ОПТВ1» используется только 1-й способ решения задачи, как это приведено в табл. 2.

Таблица 2

**Оптимизация тепловых нагрузок в котельной с пятью котлами**

Решение задачи		Сохран. мод. 5А		Восст. мод. 5А		Сохран. мод. 5Б		Восст. мод. 5Б		
ОПТВ1		Оптимизация суммарных $\Sigma Q_{i=1-j} = 380$ Гкал/ч = 441,9 МВт								
		тепловых нагрузок пяти водогрейных котлов								
j = 5		Принципиальное решение задачи основано на системе уравнений: $\varphi_i - \delta_i = 0$ .								
		«ин» – исходно-нормативные данные; «ф» и «опт» – показатели до и после оптимизации.								
$\Sigma \eta_i^{-1} =$	1/%	ф	0,022			$\Sigma K_i =$	1/%	ф	0,00	
	1/%	опт	0,022				1/%	опт	0,00	
								$\delta_i =$	1/%	
									ф	
									опт	
									0,02	
Обозн.	Разм.	Обозн.	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	$\Sigma P_{\text{кот}}$	<p>По котельной:</p> $\Sigma Q_{i=1-j} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 =$ $= Q_1^{\text{опт}} + Q_2^{\text{опт}} + Q_3^{\text{опт}} + Q_4^{\text{опт}} + Q_5^{\text{опт}}$ <p>1. Система уравнений <math>\varphi_i - \delta_i = 0</math> используется только для опред. показат. <math>\delta_i = 100(\varphi_i - \delta_i) / \delta_i</math></p> $\delta_i = \Sigma \eta_i^{-1} \cdot \Sigma K_i; K_i = a_i Q_i \eta_i^{-2} Q_{\text{ни}}^{-1}$ $\varphi_i = 2 \eta_i^{-1} (1 - a_i Q_i \eta_i^{-1} Q_{\text{ни}}^{-1})$ $\eta_i = a_i Q_i / Q_{\text{ни}} + C_i$ $C_i = b_i + C_{\text{ни}}(t_{\text{ни}} - t_{\text{нот}}) + C_{\text{тр1i}}(t_{\text{тр1i}} - t_{\text{тр1от}})$ <p>2. В случае 3-х и более котлов в котельной реш. задачи основано на опред. минимума функции <math>b = (\Sigma b_i Q_i) / \Sigma Q_i</math> оператором "Поиск решения" при опред. граничных условиях.</p> <p>Отклонение (<math>\Delta P_{\text{кот}}</math>) фактич. показат. до оптимизации от оптимальных</p>	
$Q_i^{\text{max}}$	Гкал/ч	ин	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0			
$Q_{\text{ни}}$	Гкал/ч	ин	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0			
$G_{\text{кт}}$	т/ч	ин	1200	1300	1400	1350	1250			
$a_i$	%	ин	-1,32	-4,64	-3,25	-4,12	-2,51			
$b_i$	%	ин	93,8	96,64	92,5	92,1	91,5			
$C_{\text{ни}}$	%/°С	ин	0,044	0,043	0,042	0,041	0,039			
$t_{\text{ни}}$	°С	ф	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0			
$t_{\text{нот}}$	°С	ин	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0			
$C_{\text{тр1i}}$	%/°С	ин	-0,041	-0,040	-0,042	-0,038	-0,040			
$t_{\text{тр1i}}$	°С	ф	72,0	68,0	70,0	67,0	73,0			
$t_{\text{тр1от}}$	°С	ин	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
$C_i$	%	ф	92,40	95,43	91,24	90,98	90,21			
$\varphi_i$	1/%	ф	0,022	0,023	0,023	0,024	0,023			
		опт	0,022	0,023	0,023	0,023	0,023			
$K_i$	1/%	ф	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
		опт	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
$\delta_i$	%	ф	-1,28	1,28	2,91	4,95	3,64			
		опт	-1,64	1,64	1,64	1,64	1,64			
$Q_i$	Гкал/ч	ф	75,0	80,0	70,0	73,0	82,0	380,0		
		опт	100,0	94,4	68,0	50,5	67,1			
$t_{\text{к2i}}$	°С	ф	134,5	129,5	120,0	121,1	138,6	129,1		
		опт	155,3	140,6	118,6	104,4	126,7	133,3		
$\eta_i$	%	ф	91,41	91,72	88,97	87,98	88,15	89,6		
		опт	91,08	91,05	89,03	88,9	88,53	90,0		
$b_i$	кг/Гкал	ф	156,3	155,8	160,6	162,4	162,1	159,4		
		опт	156,9	156,9	160,5	160,7	161,4	158,8		
$B_i$	т/ч	ф	11,7	12,5	11,2	11,9	13,3	60,6		
		опт	15,7	14,8	10,9	8,1	10,8	60,4		
								$\Delta = 100(B_{\text{ф}} - B_{\text{опт}}) / B_{\text{ф}} = 0,35 \%$		
								$\Delta t_{\text{к2}} = t_{\text{к2}}^{\text{ф}} - t_{\text{к2}}^{\text{опт}} = -4,18 \text{ } ^\circ\text{C}$		
								$\Delta \eta = \eta_{\text{ф}} - \eta_{\text{опт}} = -0,32 \%$		
								$\Delta b = b_{\text{ф}} - b_{\text{опт}} = 0,56 \text{ кг/Гкал}$		
								$\Delta B = B_{\text{ф}} - B_{\text{опт}} = 0,214 \text{ т/ч}$		

Следует обратить внимание на одну особенность решения системы уравнений (5). В математическом плане она позволяет вычислять  $j$  экстремальных значений определяющих ее аргументов  $Q_i^{\text{опт}} \leq 0$ , отвечающих

только одному условию:  $Q_{\text{кт}} = \sum_{i=1}^j Q_i$ . При этом достоверность решений каждого  $i$ -го уравнения в системе (5) определяется показателями, которые должны быть равными нулю:  $\delta_i = 100(\varphi_i - \bar{b})\bar{b}^{-1} \rightarrow 0$ , где по аналогии с (9)  $\varphi_i = 2\eta_i^{-1}(1 - \eta_i^{-1} a_i Q_i Q_{hi}^{-1})$ . Такой факт имеет место в табл. 1 ( $j = 2$ ):  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 \rightarrow 0$ , т. е. здесь минимум показателя  $b$ , вычисленный на основании формулы (3), лежит в пределах предусмотренных ограничений, определяющих физический смысл исследуемых аргументов:  $Q_1^{\text{опт}} \geq Q_1 > 0$  и  $Q_2^{\text{опт}} \geq Q_2 > 0$ . В случае примерного расчета (табл. 2,  $j = 5$ ) минимум показателя  $b$ , установленный по той же формуле (3), отвечает аналогичным ограничениям, в частности:  $Q_1^{\text{опт}} \geq Q_1 > 0$ ;  $Q_2^{\text{опт}} \geq Q_2 > 0$ ;  $Q_3^{\text{опт}} \geq Q_3 > 0$ ;  $Q_4^{\text{опт}} \geq Q_4 > 0$  и  $Q_5^{\text{опт}} \geq Q_5 > 0$ , но не удовлетворяет исходной системе уравнений (5), т. е. не соответствует экстремуму функции (3), так как в данном случае  $\delta_i \neq 0$ .

Далее рассмотрим 2-й метод решения системы уравнений (5), основанный, как уже отмечалось, на анализе полуэмпирической формулы Я. П. Пекера [2] по расчету балансовых потерь  $q_2$ . В отличие от 1-го метода здесь дополнительно учитываются влияния отклонений от норм избытков воздуха в уходящих газах  $\Delta\alpha_{yx}$  и их температуры  $\Delta t_{yx}$ , циркуляции воды в котле  $\Delta G_{\text{кт}}$  и степени загрязнения поверхностей нагрева  $\Delta \xi$ . Кроме того, здесь большая роль отводится организации систематического мониторинга эксплуатационных показателей котла для выявления необходимых констант в формулах аппроксимации. В конечном итоге на основании исходно-нормативных характеристик определяется фактический КПД брутто котла  $\eta_i$  с учетом влияния на него отклонений от базовых норм фактических балансовых составляющих:  $\Delta q_{2i} = q_{2i} - q_{2oi}$ ;  $\Delta q_{3i} = q_{3i} - q_{3oi}$ ;  $\Delta q_{4i} = q_{4i} - q_{4oi}$ ;  $\Delta q_{5i} = q_{5i} - q_{5oi}$ , т. е.:

$$\eta_i = \eta_{oi} - \Delta q_{2i} - \Delta q_{3i} - \Delta q_{4i} - \Delta q_{5i}, \quad (12)$$

где  $\eta_{oi}$  – исходно-нормативное значение КПД брутто котла; для газомазутных котлов можно считать:  $q_{3i} = q_{4i} \approx 0$ ;  $\Delta q_{3i} = \Delta q_{4i} \approx 0$ ; значения балансовых составляющих  $q_{5oi}$  и  $q_{5i}$ , как показали испытания [3], практически не зависят от нагрузки котла и определяются известными методами. Таким образом, решение задачи по определению фактического КПД брутто котла  $\eta_i$  сводится в основном к вычислению отклонения показателя  $\Delta q_{2i}$ .

На основании формулы Я. П. Пекера [2] вычисляем исходно-нормативное значение балансовой составляющей  $q_{2o}$  (индекс  $i$  опускаем)

$$q_{2o} = \left( K\alpha_{yxo} + C \right) \left( t_{yxo} - \frac{\alpha_{yxo} t_{xbo}}{\alpha_{yxo} + B} \right) A_{70} K_Q \cdot 10^{-2} \quad (13)$$

и выполняем анализ следующих функций:

$$q_2 = f(t_{yx}, \alpha_{yx}, t_{xb}); \quad (14)$$

$$t_{yx} = f(t_{t1}, G_{кт}, \alpha_{yx}, \xi), \quad (15)$$

где  $t_{xb}, t_{yx}, t_{t1}$  – фактические значения температуры холодного воздуха, уходящих газов и воды на входе в котел;  $\alpha_{yx}, \xi$  – коэффициенты избытка воздуха в уходящих газах и загрязнения поверхностей нагрева котла;  $G_{кт}$  – массовый расход воды через котел.

На основании (14), (15) запишем:

$$\Delta q_2 = q_2 - q_{2o} = \frac{\partial q_2}{\partial t_{yx}} \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial t_{t1}} \Delta t_{t1} + \frac{\partial t_{yx}}{\partial G_{кт}} \Delta G_{кт} + \frac{\partial t_{yx}}{\partial \alpha_{yx}} \Delta \alpha_{yx} + \frac{\partial t_{yx}}{\partial \xi} \Delta \xi \right) + \left. \begin{aligned} &+ \frac{\partial q_2}{\partial \alpha_{yx}} \Delta \alpha_{yx} + \frac{\partial q_2}{\partial t_{xb}} \Delta t_{xb}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $\Delta t_{t1} = t_{t1} - t_{t1o}$ ;  $\Delta G_{кт} = G_{кт} - G_{кто}$ ;  $\Delta \alpha_{yx} = \alpha_{yx} - \alpha_{yxo}$ ;  $\Delta t_{yx} = t_{yx} - t_{yxo}$ ;  $\Delta t_{xb} = t_{xb} - t_{xbo}$ .

На основании (13) вычисляем частные производные, входящие в формулу (16), с учетом исходно-нормативных показателей:

$$\frac{\partial q_2}{\partial t_{yx}} = \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{yx}} \right)_o = 10^{-2} K_Q (K \alpha_{yxo} + C) \left[ 0,00013 \left( 2t_{yxo} - \frac{\alpha_{yxo} t_{xbo}}{\alpha_{yxo} + B} \right) + 0,9805 \right]; \quad (17)$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t_{xb}} = \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{xb}} \right)_o = -10^{-2} A_t K_Q (K \alpha_{yxo} + C) \frac{\alpha_{yxo}}{\alpha_{yxo} + B}; \quad (18)$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial \alpha_{yx}} = \left( \frac{\partial q_2}{\partial \alpha_{yx}} \right)_o = 10^{-2} A_t K_Q \left\{ K \alpha_{yxo} - t_{xbo} \left[ \frac{K \alpha_{yxo}}{\alpha_{yxo} + B} + \frac{B (K \alpha_{yxo} + C)}{(\alpha_{yxo} + B)^2} \right] \right\}. \quad (19)$$

Значения параметров  $\alpha_{yxo}$ ,  $t_{yxo}$  и частные производные  $\partial t_{yx} / \partial t_{t1}$ ,  $\partial t_{yx} / \partial G_{кт}$ ,  $\partial t_{yx} / \partial \alpha_{yx}$ , входящие в формулы (13), (16)–(19), определяются при составлении исходно-нормативных характеристик котла и могут быть представлены в виде полиномов как функции его безразмерной нагрузки, т. е. переменной  $q = Q/Q_n$ . В общем виде каждая из этих функций представляется

$$F(q) = K_o + \sum_{i=1}^j K_i q^i, \quad (20)$$

где значения постоянных коэффициентов  $K_o$ ,  $K_i$  и число их  $j$  определяются на основании аппроксимации соответствующих исходно-нормативных зависимостей [4–6], устанавливаемых путем целенаправленных испы-

таний либо путем организации систематического мониторинга в период эксплуатации котлов.

Производную  $\partial t_{yx} / \partial \xi$ , входящую в расчетную формулу (16), отождествляем с уравнением теплопередачи через загрязненную стенку котла от газов к воде. В сущности это средняя плотность теплового потока  $q_{\text{тп}}$ , поступающего от газов к воде через поверхности нагрева котла:

$$\partial t_{yx} / \partial \xi = -(t_{yx} - t_{\text{в}}^{\text{ср}}) K_q = q_{\text{тп}}, \quad (21)$$

где  $t_{\text{в}}^{\text{ср}}$  и  $t_{yx}$  – средние значения температур воды и газов в котле;  $K_q$  – коэффициент теплопередачи от газов к воде.

На основании результатов исследования [7] известно, что в конвективном пучке котла  $\partial t_{yx} / \partial t_{\text{ж}} = 0,99-1,04$ , т. е. согласно уравнению (21) производная  $\partial t_{yx} / \partial \xi = q_{\text{тп}} \approx \text{const}$ . Очевидно, что также постоянной и не зависящей от нагрузки (при исследуемом фактическом состоянии котла) является степень загрязнения поверхностей нагрева, т. е.  $\Delta \xi = \text{const}$ . Следовательно, с небольшой погрешностью можно считать, что в расчетном уравнении (16) комплекс  $(\partial t_{yx} / \partial \xi) \Delta \xi = \text{const}$ . Его можно вычислить на основании той же формулы (16) и определить как результат неоднократного анализа показателей двух произвольных режимов работы котла с небольшим разрывом во времени ( $\Delta \tau = \tau' - \tau''$ ), определяемом условиями постоянного мониторинга или специальных испытаний:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t_{yx}}{\partial \xi} \Delta \xi = 0,5 \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{yx}} \right)_o^{-1} q_2' + q_2'' - 2q_{2o} - \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{\text{xb}}} \right)_o (t_{\text{xb}}' + t_{\text{xb}}'' - 2t_{\text{xb}o}) - \\ - \left( \frac{\partial q_2}{\partial \alpha_{yx}} \right)_o (\alpha_{yx}' + \alpha_{yx}'' - 2\alpha_{yx o}) - \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{\text{т1}}} \right)_o \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial t_{\text{т1}}} \right)' (t_{\text{т1}}' - t_{\text{т1}o}) + \\ + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial t_{\text{т1}}} \right)'' (t_{\text{т1}}'' - t_{\text{т1}o}) + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial G_{\text{кт}}} \right)' (G_{\text{кт}}' - G_{\text{кт}o}) + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial G_{\text{кт}}} \right)'' (G_{\text{кт}}'' - G_{\text{кт}o}) + \\ + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial \alpha_{yx}} \right)' (\alpha_{yx}' - \alpha_{yx o}) + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial \alpha_{yx}} \right)'' (\alpha_{yx}'' - \alpha_{yx o}). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Таким образом, расчетные формулы (13), (16)–(20), (22), (12) позволяют вычислить фактический КПД брутто котла  $\eta_i$  для последующего использования полученных результатов при решении системы уравнений (5). Реализация такого метода оптимизации нагрузок представляет научно-технический интерес в плане дальнейших исследований режимов работы котла. Характерные для этого метода громоздкие вычисления требуют организации постоянной системы мониторинга и применения вычислительной техники.

Наиболее эффективным методом оптимизации нагрузок в котельной, работающей и в базовом, и в пиковом режимах, следует считать применение программных средств по тепловым расчетам котлов т. е. 3-й метод. Реализацию такого метода оптимизации тепловых нагрузок в котельной следует рассматривать как важное мероприятие по вопросам решения проблем энергосбережения, повышению технического уровня эксплуатации энергоисточников и системы теплоснабжения в целом.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследования, изложенные в данной статье, подтверждают возможность и назревшую необходимость реализации проблем оптимизации котельных на базе соответствующих программных средств применительно к условиям производства.

1. Определены основные расчетные формулы, необходимые для организации мониторинга и разработки соответствующих программных средств по оптимизации нагрузок в водогрейной котельной.

2. Приведены и проанализированы результаты примерных расчетов, выполненных с помощью соответствующего программного средства «ОПТВ1». Обоснована эффективность его применения в условиях эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б а й р а ш е в с к и й, Б. А. Оптимизация режима работы водогрейной котельной / Б. А. Байрашевский // Электрические станции. – 1989. – № 5.
2. И н с т р у к ц и я по составлению технического отчета о тепловой экономичности работы электростанции / Н. Л. Астахов [и др.]. – М.: СЦНТИ, 1971.
3. П о т е р и тепла в окружающую среду на газомазутных водогрейных котлах: информационное письмо № 10-86. – М.: Союзтехэнерго, 1986.
4. Т и п о в а я энергетическая характеристика водогрейного котла ПТВМ-100 при сжигании природного газа: ТХ34-70-014–85. – М.: Союзтехэнерго, 1987.
5. Т и п о в а я энергетическая характеристика водогрейного котла КВ-ГМ-100 при сжигании природного газа: ТХ34-70-017–86. – М.: Союзтехэнерго, 1986.
6. Т и п о в а я энергетическая характеристика водогрейного котла КВ-ГМ-100 при сжигании мазута: ТХ34-70-018–86. – М.: Союзтехэнерго, 1987.
7. Б а й р а ш е в с к и й, Б. А. Эффективность каскадной схемы питания водогрейных котлов / Б. А. Байрашевский // Электрические станции. – 1990. – № 6.

Представлена кафедрой  
ПТЭ и ТТ БНТУ

Поступила 02.02.2009