

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-

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

где

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

КПД брутто котла η_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:

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

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

Здесь $Q_{\text{нi}}$ – номинальная нагрузка котла; a_i , v_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 $t_{\text{тои}}$. 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:

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

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 $\Sigma Q_{i=1-j} = 140$ 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: $\phi_i - b_i = 0$.			
«ин» – исходно-нормативные данные; «ф» и «опт» – показатели до и после оптимизации.			
$\Sigma \eta_i^{-1} =$	1/%	ф	0,022
	1/%	опт	0,022
$\Sigma K_i =$	1/%	ф	0,00
	1/%	опт	0,00
$b =$	1/%	ф	0,02
	1/%	опт	0,02
Обозн.	Разм.	Обозн.	i_1 i_2 $\Sigma P_{\text{КОТ}}$
Q_i^{MAX}	Гкал/ч	ин	100,0 100,0
$Q_{\text{НИ}}$	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
$t_{\text{НОИ}}$	°С	ин	15,0 15,0
$C_{\text{ТИ}}$	%/°С	ин	-0,041 -0,040
$t_{\text{ТИ}}$	°С	ф	68,0 65,0
$t_{\text{ТОИ}}$	°С	ин	70,0 70,0
C_i	%	ф	92,69 95,52
ϕ_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
δ_i	%	ф	-1,23 1,23
		опт	0,00 0,00
Q_i	Гкал/ч	ф	70,0 70,0
		опт	87,2 52,8
$t_{\text{К2i}}$	°С	ф	126,3 118,8
		опт	140,7 105,6
η_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
<p>По котельной: $\Sigma Q_{i=1-j} = Q = Q_1 + Q_2 = Q_1^{\text{ОПТ}} + Q_2^{\text{ОПТ}}$; $\phi_i - b_i = 0$, где $b_i = \Sigma \eta_i^{-1} - \Sigma K_i$; $K_i = a_i Q_i \eta_i^{-2} Q_{\text{НИ}}^{-1}$; $b_i = \Sigma \eta_i^{-1} - \Sigma K_i$; $K_i = a_i Q_i \eta_i^{-2} Q_{\text{НИ}}^{-1}$; $\phi_i = 2\eta_i^{-1}(1 - a_i Q_i \eta_i^{-1} Q_{\text{НИ}}^{-1})$; $\eta_i = a_i Q_i / Q_{\text{НИ}} + C_i$; $C_i = B_i + C_{\text{НИ}}(t_{\text{НИ}} - t_{\text{НОИ}}) + C_{\text{ТИ}}(t_{\text{ТИ}} - t_{\text{ТОИ}})$. $\delta_i = 100^*(\phi_i - b_i) / b_i$.</p> <p>1-й и наиболее рациональный способ решения задачи основан на определении минимума функции $b = (\Sigma b_i Q_i) / \Sigma Q_i$ с помощью оператора «Поиск решения» при определенных граничных условиях.</p> <p>2-й способ решения – на основании квадратного уравнения относительно $Q_i^{\text{ОПТ}}$: $\alpha (Q_i^{\text{ОПТ}})^2 + \beta Q_i^{\text{ОПТ}} + \gamma = 0$, где $\alpha = A_2^2 C_1 - A_1^2 C_2$. $A_1 = -0,015$ $A_2 = -0,052$ $\beta = -2 C_1 [A_1 C_2 + A_2 (A_2 Q + C_2)]$; $\gamma = C_1 [A_2 Q (A_2 Q + 2C_2) + (C_2 - C_1)]$; $Q_i^{\text{ОПТ}} = -0,5 \beta \alpha^{-1} + [0,25 \beta^2 \alpha^{-2} - \gamma \alpha^{-1}]^{0,5}$ $\alpha = 0,23$ Соответственно: $Q_2^{\text{ОПТ}} = Q - Q_1^{\text{ОПТ}}$.</p> <p>$\beta = 1104$ $Q_1^{\text{ОПТ}} = 87,2$ Гкал/ч $Q_2^{\text{ОПТ}} = 52,8$ Гкал/ч $\gamma = -97944$ $101,4$ МВт $61,42$ МВт</p>			
<p>В целом по котельной: отклонение ($\Delta P_{\text{КОТ}}$) фактич. показат. до оптимизации от оптимальных</p>			
<p>$\Delta = 100(B_{\text{Ф}} - B_{\text{ОПТ}}) / B_{\text{Ф}} = 0,15 \%$</p>			
<p>$\Delta t_{\text{К2}} = t_{\text{К2}}^{\text{Ф}} - t_{\text{К2}}^{\text{ОПТ}} = -4,85 \text{ } ^\circ\text{С}$</p>			
<p>$\Delta \eta = \eta_{\text{Ф}} - \eta_{\text{ОПТ}} = -0,14 \%$</p>			
<p>$\Delta b = b_{\text{Ф}} - b_{\text{ОПТ}} = 0,24$ кг/Гкал</p>			
<p>$\Delta B = B_{\text{Ф}} - B_{\text{ОПТ}} = 0,034$ т/ч</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		Сохр. мод. 5А	Восст. мод. 5А	Сохр. 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: $\phi - \delta = 0$.											
		«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		$\delta =$	1/%	ф	0,02
	1/%	опт	0,022		1/%	опт	0,00		1/%	опт	0,02		
Обозн.	Разм.	Обозн.	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	$\Sigma P_{\text{кот}}$	По котельной в целом	По котельной:			
Q_{max}	Гкал/ч	ин	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0			$\Sigma Q_{i=1-j} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 =$ $= Q_1^{\text{опт}} + Q_2^{\text{опт}} + Q_3^{\text{опт}} + Q_4^{\text{опт}} + Q_5^{\text{опт}}$			
$Q_{\text{ни}}$	Гкал/ч	ин	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0			1. Система уравнений $\phi - \delta = 0$ используется только для опред. показат. $\delta_i = 100(\phi_i - \delta) / \delta$			
$G_{\text{кт}}$	т/ч	ин	1200	1300	1400	1350	1250			$\delta = \Sigma \eta_i^{-1} \cdot \Sigma K_i$; $K_i = a_i Q_i \eta_i^{-2} Q_{\text{ни}}^{-1}$			
a_i	%	ин	-1,32	-4,64	-3,25	-4,12	-2,51			$\phi_i = 2\eta_i^{-1}(1 - a_i Q_i \eta_i^{-1} Q_{\text{ни}}^{-1})$			
b_i	%	ин	93,8	96,64	92,5	92,1	91,5			$\eta_i = a_i Q_i / Q_{\text{ни}} + C_i$			
$C_{\text{ни}}$	%/°C	ин	0,044	0,043	0,042	0,041	0,039			$C_i = b_i + C_{\text{ни}}(t_{\text{ни}} - t_{\text{noi}}) + C_{\text{т1i}}(t_{\text{т1i}} - t_{\text{т1oi}})$			
$t_{\text{ни}}$	°C	ф	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0			2. В случае 3-х и более котлов в котельной реш. задачи основано на опред. минимума функции $b = (\Sigma b_i Q_i) / \Sigma Q_i$ оператором "Поиск решения" при опред. граничных условиях.			
t_{noi}	°C	ин	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0			Отклонение ($\Delta P_{\text{кот}}$) фактич. показат. до оптимизации от оптимальных			
$C_{\text{т1i}}$	%/°C	ин	-0,041	-0,040	-0,042	-0,038	-0,040						
$t_{\text{т1i}}$	°C	ф	72,0	68,0	70,0	67,0	73,0						
$t_{\text{т1oi}}$	°C	ин	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0						
C_i	%	ф	92,40	95,43	91,24	90,98	90,21						
ϕ_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						
δ_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		$\Delta = 100(V_{\text{ф}} - V_{\text{опт}}) / V_{\text{ф}} = 0,35 \%$			
		опт	100,0	94,4	68,0	50,5	67,1						
$t_{\text{к2i}}$	°C	ф	134,5	129,5	120,0	121,1	138,6	129,1	$\Delta t_{\text{к2}} = t_{\text{к2}}^{\text{ф}} - t_{\text{к2}}^{\text{опт}} = -4,18 \text{ } ^\circ\text{C}$				
		опт	155,3	140,6	118,6	104,4	126,7	133,3					
η_i	%	ф	91,41	91,72	88,97	87,98	88,15	89,6	$\Delta \eta = \eta_{\text{ф}} - \eta_{\text{опт}} = -0,32 \%$				
		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	$\Delta b = b_{\text{ф}} - b_{\text{опт}} = 0,56 \text{ кг/Гкал}$				
		опт	156,9	156,9	160,5	160,7	161,4	158,8					
V_i	т/ч	ф	11,7	12,5	11,2	11,9	13,3	60,6	$\Delta V = V_{\text{ф}} - V_{\text{опт}} = 0,214 \text{ т/ч}$				
		опт	15,7	14,8	10,9	8,1	10,8	60,4					

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) $\varphi_i = 2\eta_i^{-1}(1 - \eta_i^{-1} a_i Q_i Q_{\text{ни}}^{-1})$. Такой факт имеет место в табл. 1 ($j = 2$): $\delta_i = \delta_1 = \delta_2 \rightarrow 0$, 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 $\Delta\alpha_{\text{yx}}$ и их температуры Δt_{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 η_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 η_{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 η_i сводится в основном к вычислению отклонения показателя Δq_{2i} .

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

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

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; α_{yx}, ξ – 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 α_{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:

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

Таким образом, расчетные формулы (13), (16)–(20), (22), (12) позволяют вычислить фактический КПД брутто котла η_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