

УДК: 697.34

Д. А. КОВАЛЁВ, аспирант

Харьковская национальная академия городского хозяйства, г. Харьков

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

*Рассматриваются вопросы повышения эффективности эксплуатации источника тепловой энергии – котельной, за счет выбора рациональных величин расходов теплоносителя для отдельных котлов.*

*Розглядаються питання підвищення ефективності експлуатації джерела теплової енергії – котельної, за рахунок вибору раціональних величин витрат теплоносія для окремих котлів.*

### Введение

Известно [1], что система централизованного теплоснабжения (СЦТ) города представляет собой сложную иерархическую структуру, в состав которой входят: источник тепловой энергии (ТЭС или районные котельные), магистральные тепловые сети с подкачивающими насосными станциями на них и тепловыми камерами, центральные тепловые пункты (ЦТП) на группы зданий, внутриквартальные тепловые сети, индивидуальные тепловые пункты с системами отопления (ИТП с СО) и непосредственно тепловые приборы потребителей тепловой энергии.

Исходя из проведенных ранее исследований и публикаций [2,3] актуальным, ввиду высокой стоимости топливно-энергетических ресурсов, является решение задач по повышению эффективности эксплуатации объектов СЦТ, в частности, по повышению эффективности эксплуатации источника тепловой энергии – котельной. Одним из вариантов решения этой задачи может быть выбор рациональных величин расходов теплоносителя для отдельных котлов котельной.

### Основная часть

Для источника тепловой энергии – котельной ОАО «Хартрон» (г. Харьков) был проведен пассивный эксперимент, в результате которого были получены массивы данных почасовой работы водогрейных газомазутных котлов (ПТВМ). Существующая котельная оборудована 4 котлами ПТВМ-30М, во время проведения пассивного эксперимента требуемое количество тепловой энергии производилось двумя работающими котлами.

Водогрейный отопительный котел ПТВМ-30 М тепловой мощностью 35 МВт (30 Гкал/ч) предназначен для получения горячего теплоносителя давлением до 1,35 МПа (13,5 кгс/см<sup>2</sup>) и температурой до 150 °С [4].

Котел ПТВМ-30М оборудован шестью газомазутными горелками, установленными по три встречно на каждой боковой стенке топочной камеры котла. Диапазон управления нагрузкой отопительных котлов 30-100% номинальной производительности. Управление производительностью осуществляется путем изменения числа работающих горелок.

Технические данные котла ПТВМ-30 М приведены в табл. 1 [5].

Для повышения эффективности эксплуатации котельной ОАО «Хартрон» целесообразно выбрать рациональные величины расходов теплоносителя для котлов ПТВМ - 30 М, при которых суммарные затраты для котельной будут минимальными, при условии, что общая тепловая производительность котлов будет соответствовать требуемым значениям.

Для этого при текущих температурах: наружного воздуха, уходящих дымовых газов и теплоносителя до и после котлов необходимо выбрать такое сочетание расходов теплоносителя через котлы при которых суммарные затраты (З) для котельной будут минимальными:

Таблица 1

Технические данные котла ПТВМ-30М

Наименование	Единица измерения	Величина
Тепловая производительность	МВт (Гкал/ч)	
а) топливо – газ		35 (30)
б) топливо – мазут		35 (30)
Рабочее давление	МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	1-1,68 (10-16,8)
Номинальная температура теплоносителя	°С	
а) на входе		70
б) на выходе		150
Номинальный расход теплоносителя, при режиме	кг/с (т/ч)	
а) пиковом		208,3(750)
б) основном		103,3 (372)
Расчётное гидравлическое сопротивление котла	МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,25 (2,5)
Температура уходящих газов	°С	
а) топливо – газ		150
б) топливо – мазут		220
К.П.Д. брутто	%	
а) топливо – газ		91,08
б) топливо – мазут		87,91
Расход топлива		
а) топливо – газ	нм <sup>3</sup> /с (нм <sup>3</sup> /ч)	1,08(3880)
б) топливо – мазут	кг/с (кг/ч)	1,03(3700)
Минимальный расход теплоносителя через котёл	кг/с (т/ч)	90,3 (325)

$$Z = \sum_{i=1}^2 Z_i \rightarrow \min, \quad \text{грн/ч} \quad (1)$$

где  $Z_i$  – величина затрат для каждого работающего котла, грн/ч;

$i = \overline{1;2}$  – количество постоянно работающих котлов.

Величина затрат для каждого котла представляет собой:

$$Z_i = Z_i(N) + Z_i(Q), \quad \text{грн/ч} \quad (2)$$

где  $Z_i(N)$  – величина затрат на электрическую энергию для преодоления гидравлического сопротивления работающих котлов и потерь давления в магистральной тепловой сети, грн/час;

$Z_i(Q)$  – величина затрат на тепловую производительность для каждого работающего котла, грн/ч;

Величина затрат на электрическую энергию для каждого работающего котла для преодоления его гидравлического сопротивления и потерь давления в магистральной тепловой сети определяем по формуле:

$$Z_i(N) = Z_{эл} \cdot N_i, \quad \text{грн/ч} \quad (3)$$

где  $Z_{эл} = 0,485$  грн/кВт•ч – тариф на электрическую энергию;

$N_i$  – мощность электродвигателя насоса на преодоление гидравлических сопротивлений котла и магистральной тепловой сети, кВт;

Величина затрат на тепловую производительность для каждого работающего котла определяем по формуле:

$$Z_i(Q) = Z_{\text{тепл}} \cdot Q_i, \quad \text{грн/ч}, \quad (4)$$

где:  $Z_{\text{тепл}} = 265,12$  грн/Гкал·ч – тариф на тепловую энергию;

$Q_i$  – тепловая производительность котла, Вт;

Исходя из [6], мощность электродвигателя насоса на преодоление гидравлических сопротивлений котла и магистральной тепловой сети определяется по формуле:

$$N_i = \frac{F_{\text{тепл},i} \cdot (P_{\kappa,i} + P_c) \cdot g}{1000 \cdot \eta}, \quad \text{кВт}, \quad (5)$$

где  $F_{\text{тепл},i}$  – расход теплоносителя проходящего через котел, кг/с;

$P_{\kappa,i}$  – гидравлическое сопротивление котла, м. вод. ст;

$P_c$  – гидравлическое сопротивление магистральной тепловой сети, м. вод. ст;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> [7];

$\eta$  – к.п.д. насоса, принимаем  $\eta = 0,6$  [6];

Гидравлическое сопротивление котла определяем по формуле [8]:

$$P_{\kappa,i} = P_{\kappa,i \text{ расч}} \cdot \left( \frac{F_{\text{тепл},i}^2}{F_{\text{ном}}^2} \right), \quad \text{МПа}, \quad (6)$$

где  $P_{\kappa,i \text{ расч}} = 0,25$  МПа – расчетное гидравлическое сопротивление котла (табл. 1);

$F_{\text{ном}} = 103,3$  кг/с – номинальный расход теплоносителя проходящего через котел при основном режиме (табл. 1);

Гидравлическое сопротивление магистральной тепловой сети определяем по формуле [9]:

$$P_c = 2 \cdot (R \cdot l \cdot (1 + \kappa_M)), \quad \text{МПа}, \quad (7)$$

где  $R$  – удельные потери давления на трение на участке магистральной тепловой сети, принимаем  $R = 80$  Па/м [9];

$l$  – длина участка магистральной тепловой сети от котельной ОАО Хартрон до ТРС,  $l = 420$  м;

$\kappa_M$  – коэффициент потерь давления на местные сопротивления, принимаем  $\kappa_M = 0,25$  [9].

Исходя из [10] упрощенно определяем тепловую производительность котла:

$$Q_i = Q_{\text{тепл},i} + Q_{\text{у.д.г.и}}, \quad \text{Вт}, \quad (8)$$

где  $Q_{\text{тепл},i}$  – количество тепловой энергии производимое котлом, Вт;

$Q_{\text{у.д.г.и}}$  – потери тепловой энергии с уходящими дымовыми газами, Вт;

Количество тепловой энергии производимое котлом определяем по формуле [10]:

$$Q_{\text{тепл},i} = c_{\text{тепл}} \cdot F_{\text{тепл},i} \cdot (T_{1i} - T_{2i}), \quad \text{Вт}, \quad (9)$$

где  $c_{тепл}$  – удельная теплоемкость теплоносителя,  
 $c_{тепл} = 4187 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$  [7];  
 $T_{1i}$  – температура теплоносителя после  $i$ -го котла,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $T_{2i}$  – температура теплоносителя перед  $i$ -м котлом,  $^\circ\text{C}$ ;  
 Теплосодержание уходящих дымовых газов определяем по формуле [10]:

$$Q_{y.d.z.i} = c_{y.d.z} \cdot F_{y.d.z.i} \cdot T_{y.d.z.i}, \quad \text{Вт}, \quad (10)$$

где:  $c_{y.d.z}$  – удельная теплоемкость уходящих дымовых газов,  
 $c_{y.d.z} = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$  [7];  
 $F_{y.d.z.i}$  – расход уходящих дымовых газов после  $i$ -го котла,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  
 $T_{y.d.z.i}$  – температура уходящих дымовых газов после  $i$ -го котла,  $^\circ\text{C}$ ;  
 Расход уходящих дымовых газов после  $i$ -го котла [10]:

$$F_{y.d.z.i} = F_{газа i} \cdot V_{сг} \cdot \rho_{y.d.z}, \quad \text{м}^3/\text{ч}, \quad (11)$$

где:  $F_{газа i}$  – расход сжигаемого газа для  $i$ -го котла,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  
 $V_{сг}$  – объем продуктов сгорания газа на  $\text{м}^3$  сжигаемого газа, для природного газа  
 $V_{сг} = 10,52 \text{ м}^3$  на  $\text{м}^3$  сжигаемого газа [7];  
 $\rho_{y.d.z}$  – плотность уходящих дымовых газов [10],  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Из массивов данных полученных в результате проведения пассивного эксперимента на котельной ОАО «Хартрон» были выбраны пять различных значений  $T_{1i}$  и соответствующие им значения  $T_{2i}$ ,  $F_{тепл}$ ,  $F_{газа}$ ,  $T_{y.d.z}$  для двух котлов работающих одновременно (табл. 2).

Таблица 2

Экспериментальные значения параметров технологического процесса котельной  
ОАО «Хартрон»

№	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$F_{тепл}$		$F_{газа}$		$T_{y.d.z}, ^\circ\text{C}$
			$\text{м}^3/\text{ч}$	$\text{кг}/\text{с}$	$\text{м}^3/\text{ч}$	$\text{кг}/\text{с}$	
1 котел							
1	88	51	475	132	3340	928	110
2	96	50	470	131	4700	1306	118
3	110	49	475	132	5195	1443	130
4	122	50	470	131	5700	1583	162
5	130	55	465	129	5755	1599	163
2 котел							
1	65	51	490	136	3340	928	69
2	74	50	490	136	5700	1583	80
3	88	55	495	138	6245	1735	99
4	95	59	490	136	6600	1833	100
5	110	60	450	125	6800	1889	124

Для выбранных параметров технологического процесса котельной по приведенным выше формулам (5) – (11) были рассчитаны значения мощности электродвигателей насосов и тепловой производительности для характерного при проведении пассивного эксперимента режима с двумя работающими котлами (табл. 3).

Задача выбора рациональных величин расходов теплоносителя для двух котлов источника тепловой энергии ПТВМ-30М, с использованием стандартных программных комплексов (Excel) может быть поставлена как задача нелинейного математического программирования [11], т. е. выражение (1) является целевой функцией. Далее, варьируя параметры управления, необходимо найти такие значения  $F_{тепл.i}$  для двух работающих

котлов, которые обеспечат минимальные затраты для котельной, при условии изменения расхода теплоносителя в пределах 10 %  $F_{менл.i}$  [4].

Таблица 3

Расчетные значения мощности электродвигателей насосов и тепловой производительности котельной ОАО «Хартрон»

№	$P_{к.и}$ м. вод. ст.	$P_c$ м. вод. ст.	$N_i$ , кВт	$Q_{менл.}$ Вт	$F_{y.d.z.}$		$Q_{y.d.z.i}$ Вт	$Q_{i}$ Вт
					м <sup>3</sup> /ч	кг/с		
1 котел								
1	40,76	8,4	105,946	20440701	35137	8,8	869636	21310337
2	39,91		103,010	25145261	49444	12,4	1312738	26457999
3	40,76		105,946	33699535	54651	13,7	1598553	35298088
4	39,91		103,010	39357800	59964	15,0	2185688	41543488
5	39,06		100,133	40561563	60543	15,1	2220400	42781962
2 котел								
1	43,38	8,4	115,105	7978561	35137	8,8	545499	8524060
2	43,38		115,105	13677533	59964	15,0	1079352	14756885
3	44,27		118,278	18998513	65697	16,4	1463410	20461922
4	43,38		115,105	20516300	69432	17,4	1562220	22078520
5	36,58		91,840	26168750	71536	17,9	1995854	28164604

Из выражений (1)–(4) определяем расчетные затраты для котельной (табл. 4).

Таблица 4

Расчетные затраты для котельной ОАО «Хартрон»

№	1 котел				2 котел				3, грн/час
	$N_i$ , кВт	$З_i(N)$ грн/час	$Q_{i}$ Вт	$З_i(Q)$ грн/час	$N_i$ , кВт	$З_i(N)$ грн/час	$Q_{i}$ Вт	$З_i(Q)$ грн/час	
1	105,946	51,38	21310337	6570,71	115,105	55,83	8524060	2628,26	9306,19
2	103,010	49,96	26457999	8157,92	115,105	55,83	14756885	4550,06	12813,76
3	105,946	51,38	35298088	10883,62	118,278	57,36	20461922	6309,12	17301,49
4	103,010	49,96	41543488	12809,29	115,105	55,83	22078520	6807,57	19722,65
5	100,133	48,56	42781962	13191,16	91,840	44,54	28164604	8684,12	21968,39

Область определения целевой функции будет определяться соотношениями:

$$Q_{менл} = \sum Q_{менл.i} \quad (12)$$

$$F_{ном. min} \leq F_{менл.i} \leq F_{ном. max} \quad (13)$$

Для решения задачи выбора рациональной тепловой производительности для двух котлов необходимо разработать алгоритм оценки целевой функции:

$$Z = Z_{эл} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{F_{менл.i} \cdot (P_{к.и} + P_c) \cdot g}{1000 \cdot \eta} \right) + Z_{менл} \cdot \sum_{i=1}^n \left( (c_{менл} \cdot F_{менл.i} \cdot (T_{1i} - T_{2i})) + (c_{y.d.z.} \cdot F_{y.d.z.} \cdot T_{y.d.z.}) \right) \quad (14)$$

Применяя МНК получены линейные зависимости между расчетными значениями  $Q_{y.d.z.i} = f(F_{менл.i})$  для двух котлов :

$$1 \text{ котел: } Q_{y.d.z.1} = - 417668 + 0,065 \cdot (F_{менл.1}) \quad (15)$$

$$2 \text{ котел: } Q_{y.d.z.2} = - 46274 + 0,079 \cdot (F_{менл.2}) \quad (16)$$

Подставляя (15) и (16) в (14) получаем:

$$\begin{aligned}
 Z = & 3_{эл} \cdot \left( \frac{F_{менл1} \cdot (P_{к.1} + P_c) \cdot g}{1000 \cdot \eta} \right) + 3_{менл} \cdot \left( (c_{менл} \cdot F_{менл1} \cdot (T_{1.1} - T_{2.1})) + (-417668 + 0,065(c_{менл} \cdot F_{менл1} \cdot (T_{1.1} - T_{2.1}))) \right) + \\
 & + 3_{эл} \cdot \left( \frac{F_{менл2} \cdot (P_{к.2} + P_c) \cdot g}{1000 \cdot \eta} \right) + 3_{менл} \cdot \left( (c_{менл} \cdot F_{менл2} \cdot (T_{1.2} - T_{2.2})) + (-46274 + 0,079(c_{менл} \cdot F_{менл2} \cdot (T_{1.2} - T_{2.2}))) \right) \cdot
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Для решения задачи по повышению эффективности эксплуатации котельной применяем программное средство Excel – поиск решения, использующее алгоритм нелинейной оптимизации Generalized Reduced Gradient [12]. При этом процедура поиска решения позволяет найти оптимальное значение формулы содержащейся в ячейке, которая называется целевой. Эта процедура работает с группой ячеек, прямо или косвенно связанных с формулой в целевой ячейке. Чтобы получить по формуле, содержащейся в целевой ячейке, заданный результат, процедура изменяет значения во влияющих ячейках. Для сужения множества значений, используемых в модели, применяются ограничения. Эти ограничения могут ссылаться на другие влияющие ячейки.

В результате расчетов целевой функции (17) получаем значения расходов теплоносителя для двух котлов, а также величину затрат для котельной (табл. 5).

Таблица 5

Полученные значения расходов теплоносителя для двух котлов, а также величина затрат для котельной ОАО «Хартрон»

№	1 котел		2 котел		3, грн/час
	$F_{менл}$		$F_{менл}$		
	кг/с	м <sup>3</sup> /ч	кг/с	м <sup>3</sup> /ч	
1	138	497	125	450	9259,56
2	140	504	128	460	12598,55
3	142	512	126	453	17240,64
4	141	508	120	432	19511,8
5	143	514	124	446	21796,82

### Выводы

1. Для повышения эффективности эксплуатации источника тепловой энергии – котельной был разработан алгоритм выбора рациональных величин расходов теплоносителя для отдельных котлов источника тепловой энергии – котельной.

2. В результате расчетов были получены значения расходов теплоносителя для двух котлов, а также величины затрат для котельной, которые меньше расчетных затрат.

3. Разработанный алгоритм выбора рациональных величин расходов теплоносителя для отдельных котлов источника тепловой энергии – котельной в первом приближении может быть использован при создании систем автоматического управления (САУ) технологическими процессами для объектов управления закрытой СЦТ.

### Список литературы

1. Н. А. Шульга, А. А. Бобух, Д. А. Ковалев. Исследование закрытой системы централизованного теплоснабжения как сложного объекта управления. // Коммунальное хозяйство городов: Науч.- техн. сб. Вып. 72. – К: Техніка, 2006. – С. 164 – 169.

2. Н. А. Шульга, А. А. Бобух, Д. А. Ковалев. Разработка многопараметрической линейной математической модели источника тепловой энергии – котельной// Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 67. – К.: Техніка, 2006. – С. 206 – 211.

3. Н. А. Шульга, А. А. Бобух, Д. А. Ковалев. К вопросу применения метода наименьших квадратов для разработки математических моделей объектов управления технологическими процессами инженерных систем// XXXIII научно-техническая

конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ: тезисы докл. – Харьков, 2006. – С. 223.

4. Котел водогрейный типа ПТВМ-30М. Руководство по монтажу и эксплуатации А-7513 РЭ. Дорогобужкотломаш. 20 с.

5. Павлов Н.И. Котельные установки и тепловые сети/ Н. И.Павлов, М. Н.Федоров. – М : Стройиздат. 1986. – 232 с.

6. Справочник эксплуатационника газифицированных котельных/ Под ред. Е. Б. Столпнера. – Л.: Недра, 1988. – 608 с.

7. Чеботарев В.П. Справочник работника газифицированных котельных/ Чеботарев В. П. – К.: Основа, 2000. – 298 с.

8. Справочник по гидравлике/ Под ред. В.А. Большакова. – К.: Вища школа, 1984. – 343 с.

9. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. – К: Мінрегіонбуд України, 2009. – 56 с.

10. Тепловой расчет котельных агрегатов/ Под ред. Н. В. Кузнецова. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

11. Стоянов Ф. А. Методы системного анализа в задачах рационального проектирования централизованных систем теплоснабжения: Учеб. пособие для студентов вузов/ Стоянов Ф. А., Андреев С. Ю., Шевченко Л. П. – Харьков: Золотые страницы, 2005. – 140 с.

12. Васильев А. Н. Научные вычисления в Microsoft Excel/ Васильев А. Н. – М.: Издательский дом «Вильяме», 2004. – 512 с.

## **INCREASE OF EFFICIENCY OF OPERATION OF THE SOURCE OF THERMAL ENERGY**

D. A. KOVALJEV, graduate student

*The question of increase of efficiency of operation of a source of thermal energy – a boiler-house, at the expense of a choice of rational sizes of expenses of the heat-carrier for separate coppers are considered.*

*Поступила в редакцию 20.10 2010 г.*