

УДК 621.371: 330.138

Никитин Е.Е.

Институт газа НАН Украины

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ С БАЗОВЫМ И ПИКОВЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Сформульована задача вибору оптимальної встановленої потужності базового та пікового теплового джерела. Запропоновано метод вирішення сформульованої задачі оптимізації. Виконано розрахунок оптимального співвідношення встановленої потужності теплового насоса та традиційного газового водогрійного котла, а також виконано числене моделювання впливу різних факторів на вибір оптимальної встановленої потужності цих теплових джерел.

Сформулирована задача выбора оптимальной установленной мощности базового и пикового теплового источника. Предложен метод решения сформулированной задачи оптимизации. Выполнен расчет оптимального соотношения установленной мощности теплового насоса и традиционного газового водогрейного котла, а также выполнено численное моделирование влияния различных факторов на выбор оптимальной установленной мощности этих тепловых источников.

The task of selection of the optimal installed capacity for basic and peak heat source is defined. Problem-solving procedure for the defined optimization problem is proposed. The calculation of optimal relation between installed capacity of heat pump and traditional gas hot water boiler was carried out. Also, numeral modeling of various factors impact on the selection of optimal installed capacity of these heat sources was carried out.

a – коэффициент дополнительных затрат;
 m – количество суток в отопительный период;
 m_1 – количество суток с температурой из i -го интервала;
 Q – установленная мощность теплового источника, кВт;
 T – период, за который рассчитываются суммарные затраты, лет;
 t – центр температурного интервала, °С;
 Δt – величина температурного интервала, °С;
 z – количество температурных интервалов;
 η – коэффициент преобразования энергии;
 E – годовое количество тепловой энергии, выработанной тепловым источником, кВт·ч;
 Z – суммарные затраты, грн.;
 K – капитальные затраты, грн.,
 k – удельные капитальные затраты, грн./кВт;

КПД – коэффициент полезного действия;
 COP – коэффициент преобразования;
 СЦТ – система централизованного теплоснабжения;
 ТИ – тепловой источник;
 ТЭР – топливно-энергетические ресурсы;
 c – цена энергоносителя, грн./кВт·ч;
 \mathcal{E} – годовые эксплуатационные затраты, грн.

Индексы нижние:

b – базовый;
 p – пиковый;
 i – номер температурного интервала;
 cp – средняя;
 $p.o$ – расчетная за отопительный период;
 vn – внутренняя;
 max – максимальный.

Одной из главных составляющих стратегии теплоснабжения Украины является техническая и технологическая модернизация оборудования [1]. При этом важная роль должна отводиться решению задач технико-экономической оптимизации. Оптимизация любой энергетической системы означает вариацию структуры и пара-

метров с целью минимизации капитальных и эксплуатационных затрат при соответствующих технических, экологических и ресурсных ограничениях [2].

Выбор установленной мощности базовых и пиковых тепловых источников (ТИ) является одной из типичных задач оптимизации систем

теплоснабжения. В работах [3, 4] эта задача решается применительно к тепловым электрическим станциям на органическом и ядерном топливе и крупным водогрейным котлам, работающим в составе больших систем централизованного теплоснабжения (СЦТ).

В настоящее время в Украине наблюдается тенденция децентрализации систем теплоснабжения, однако СЦТ остаются основой коммунальной теплоэнергетики страны и проблема их оптимальной модернизации является чрезвычайно актуальной. В этих условиях задача оптимизации выбора установленной мощнос-

ти базового и пикового оборудования приобретает особую актуальность применительно к новым видам ТИ (тепловым насосам, газовым конденсационным котлам, электродкотлам, котлам на биотопливе и местных видах топлива, солнечным коллекторам) и современным ценам на природный газ, электроэнергию и местные виды топлива.

Каждый из видов ТИ характеризуется определенной энергетической эффективностью, ценой используемого топливно-энергетического ресурса и удельными капитальными затратами (табл. 1).

Табл. 1. Характеристики тепловых источников

ТИ	Коэффициент преобразования первичного энергоносителя (η), %	Удельные капитальные затраты (к), грн./кВт	Цена первичного энергоносителя, грн./кВт·ч	Целесообразный режим использования
Газовый котел	КПД = 90	500	Природный газ 0,30	Базовый, пиковый
Газовый конденсационный котел	КПД = 106	1000	Природный газ 0,30	Базовый
Электрический котел	КПД = 95	200	Электроэнергия 0,70	Пиковый
Тепловой насос	СОР = 2,5...4	2500	Электроэнергия 0,70	Базовый
Автоматизированный котел на торфе	КПД = 88	1600	0,10	Базовый

Применение ТИ с более низкими эксплуатационными затратами сопряжено, как правило, с более высокими капитальными затратами. Это оборудование целесообразно использовать в базовом режиме. Примерами такого оборудования являются тепловые насосы, конденсационные котлы или автоматизированные котлы на биотопливе. Применение ТИ с более высокими эксплуатационными затратами сопряжено, как правило, с меньшими капитальными затрата-

ми. Это оборудование целесообразно использовать в пиковом режиме. Примерами такого оборудования являются традиционные газовые котлы или электродкотлы.

Стоимость оборудования увеличивается пропорционально его мощности, что диктует целесообразность выбора установленной мощности дорогостоящего высокоэкономичного оборудования таким образом, чтобы оно работало в базовом режиме. При этом пиковые на-

грузки могут покрываться более дешевым, но менее экономичным оборудованием.

Критерием технико-экономической эффективности выбора установленной мощности базового и пикового ТИ является минимизация суммарных (капитальных и эксплуатационных) затрат за определенный период эксплуатации [3, 5]:

$$Z = K + TЭ \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$Z = k_6 Q_6 + k_n Q_n + T(E_6 c_6 a_6 / \eta_6 + E_n c_n a_n / \eta_n) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где k_6, k_n – удельные капитальные затраты на базовый и пиковый ТИ, грн./кВт;

Q_6, Q_n – установленная мощность базового и пикового ТИ, кВт;

E_6, E_n – годовое количество тепловой энергии, выработанной базовым и пиковым ТИ, кВт·ч;

c_6, c_n – цена первичного энергоносителя, используемого в базовом и пиковом ТИ, грн./кВт·ч;

η_6, η_n – коэффициент преобразования первичного энергоносителя, использованного для выработки теплоты в базовом и пиковом ТИ. Например, если базовым ТИ является тепловой насос, то первичным энергоносителем является электроэнергия, а коэффициент преобразования – это коэффициент трансформации теплового насоса. При этом пиковым ТИ может являться газовый котел, для которого первичным энергоносителем является природный газ, а коэффициент преобразования первичного энергоносителя – это КПД котла;

a_6, a_n – коэффициент дополнительных затрат в пиковом и базовом ТИ, который показывает отношение общих эксплуатационных затрат к энергетической составляющей затрат на производство тепловой энергии.

Далее будем рассматривать решение задачи выбора оптимальной установленной мощности базового и пикового ТИ применительно к отопительной нагрузке, которая наиболее полно может быть охарактеризована гистограммой

где K – капитальные затраты, грн.,

$Э$ – годовые эксплуатационные затраты, грн.,

T – период, за который рассчитываются суммарные затраты. Для энергетического оборудования целесообразно принять $T = 10$ лет.

Для системы, включающей в себя пиковый и базовый ТИ, формула (1) может быть представлена в виде:

распределения среднесуточных температур наружного воздуха в течение отопительного периода (рис. 1).

Эта гистограмма показывает количество суток m_i со среднесуточной температурой t_i , попадающей в интервал $[t_i - 0,5\Delta t; t_i + 0,5\Delta t)$. При этом продолжительность отопительного периода $m = \sum m_i$. Представленная выше гистограмма построена для девяти температурных интервалов ($i = 1, 2, \dots, 9$), при этом величина интервала составляет $\Delta t = 4$ °С, а величины t_i принимают значения, представленные на горизонтальной оси гистограммы (рис. 1). Продолжительность отопительного периода составляет $m = 181$ суток, а средняя температура за отопительный период $t_{cp} = -1$ °С, что характерно для города Киева.

В общем случае значения центров температурных интервалов (t_i), количество интервалов (z) и величина интервала (Δt) связаны между собой зависимостями:

$$z = (t_z - t_1) / \Delta t + 1, \quad (3)$$

$$t_i = t_1 + i\Delta t. \quad (4)$$

Значение центра крайнего левого температурного интервала должно приниматься равным или меньше расчетной температуры наружного воздуха для проектирования систем отопления $t_1 \leq t_{p.o}$ [6]. Значение центра крайнего правого температурного интервала должно

Кол-во суток в температурном интервале



Рис. 1. Гистограмма распределения температур наружного воздуха за отопительный период.

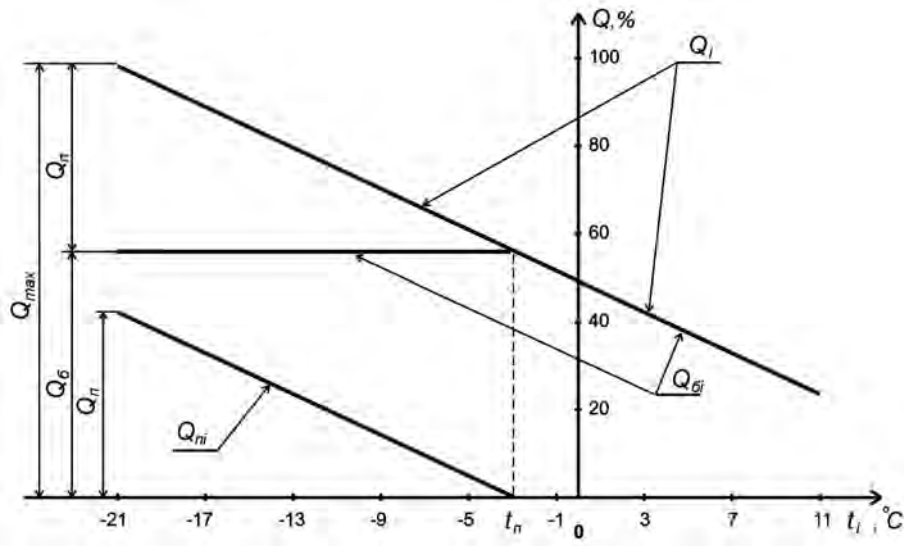


Рис. 2. Зависимость мощности базового и пикового ТИ от температуры наружного воздуха.

быть больше или равно максимальной температуре наружного воздуха за отопительный период $t_z \geq t_{max}$.

Введем в рассмотрение понятие пиковой температуры (t_n) – это такая температура наружного воздуха, выше которой тепловая нагрузка потребителя обеспечивается только базовым ТИ, а ниже которой – базовым и пиковым ТИ.

Это понятие наглядно может быть проиллюстрировано графиком, который характеризует зависимость мощности базового и пикового ТИ от температуры наружного воздуха (рис. 2). Пиковая температура характеризуется точкой перелома графика зависимости мощности базового источника от температуры наружного воздуха.

Кроме этого понятия введем в рассмотрение следующие величины (см. рис. 2).

Суммарная максимальная мощность базового и пикового ТИ (Q_{\max}) – это мощность, которая позволяет обеспечить отопительную нагрузку потребителя при минимальной расчетной температуре наружного воздуха (t_{\min}) и заданной температуре воздуха внутри помещения ($t_{\text{вн}}$). Эта величина равна суммарной установленной мощности базового ($Q_{\text{б}}$) и пикового ($Q_{\text{п}}$) ТИ без учета резервной мощности (вопрос о величине и типе резервной мощности должен рассматриваться отдельно).

$$Q_{\max} = Q_{\text{б}} + Q_{\text{п}}. \quad (5)$$

Суммарная мощность базового и пикового ТИ при температуре t_i :

$$Q_i = Q_{\max} (t_{\text{вн}} - t_i) / (t_{\text{вн}} - t_{\min}). \quad (6)$$

Из графика, представленного на рис. 2, видно, что распределение установленной мощности между базовым и пиковым ТИ зависит от выбора пиковой температуры $t_{\text{п}}$:

$$Q_{\text{б}} = Q_{\max} (t_{\text{вн}} - t_{\text{п}}) / (t_{\text{вн}} - t_{\min}), \quad (7)$$

$$Q_{\text{п}} = Q_{\max} - Q_{\text{б}} = Q_{\max} (t_{\text{п}} - t_{\min}) / (t_{\text{вн}} - t_{\min}). \quad (8)$$

Мощность базового ТИ при температуре t_i определяется по формуле:

$$Q_{\text{б}i} = \begin{cases} Q_{\max} (t_{\text{вн}} - t_i) / (t_{\text{вн}} - t_{\min}), & \text{если } t_i \geq t_{\text{п}} \\ Q_{\text{б}}, & \text{если } t_i < t_{\text{п}} \end{cases}. \quad (9)$$

Мощность пикового ТИ при температуре t_i определяется по формуле:

$$Q_{\text{п}i} = \begin{cases} 0, & \text{если } t_i \geq t_{\text{п}} \\ Q_i - Q_{\text{б}i} = Q_{\max} (t_{\text{п}} - t_i) / (t_{\text{вн}} - t_{\min}), & \text{если } t_i < t_{\text{п}} \end{cases}. \quad (10)$$

Располагая выражениями (9), (10) для определения тепловых нагрузок базового и пикового ТИ в зависимости от температуры наружного воздуха, а также гистограммой распределения температур наружного воздуха за отопительный сезон (рис. 1), можно определить годовое количество использованных ТЭР:

$$E_{\text{б}} = 24 \sum Q_{\text{б}i} m_i, \quad (11)$$

$$E_{\text{п}} = 24 \sum Q_{\text{п}i} m_i, \quad (12)$$

где:

$E_{\text{б}}$ – годовое количество ТЭР, использованное базовым ТИ (кВт·ч),

$E_{\text{п}}$ – годовое количество ТЭР, использованное пиковым ТИ (кВт·ч).

Анализируя выражения (3) – (10) можно отметить, что величина суммарных затрат (3) будет зависеть от выбора пиковой температуры $t_{\text{п}}$, таким образом, рассматриваемая задача оптимизации заключается в том, чтобы выбрать такую пиковую температуру, при которой суммарные затраты будут минимальными.

Пиковая температура может принимать значения, равные значениям центров температурных интервалов (рис. 1).

$$t_{\text{п}} = \{t_i\}, i=1, 2, \dots, z.$$

Тогда математическая формулировка рассматриваемой задачи оптимизации может быть представлена в виде:

$$Z(t_{\text{п}}) \rightarrow \max, t_{\text{п}} \in \{t_i\}.$$

Учитывая, что множество $\{t_i\}$ состоит из ограниченного количества элементов (практически не более сорока), рассматриваемая задача может быть решена методом полного перебора всех вариантов.

Разработанная математическая модель реализована с помощью электронных таблиц MS Excel.

Для иллюстрации практического применения разработанного методического подхода и математической модели выполним расчетное исследование влияния различных факторов на оптимальное соотношение установленной мощности базового и пикового ТИ в комбинации «тепловой насос (базовый ТИ) + газовый котел (пиковый ТИ)» для системы отопления с температурными условиями, которые характеризуются гистограммой, представленной на рис. 1. Техничко-экономические характеристики оборудования представлены в табл. 1. Другие необходимые исходные данные представлены в

Табл. 2. Исходные данные

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Величина
Внутренняя температура	$t_{\text{вн}}$	°С	20
Максимальная суммарная мощность,	Q_{max}	кВт	1000,00
Период проекта, лет	T	лет	10,00
Коэффициент дополнительных затрат базового ТИ (тепловой насос)	$a_{\text{б}}$	–	1,50
Коэффициент дополнительных затрат пикового ТИ (газовый котел)	$a_{\text{п}}$	–	1,50

Табл. 3. Дополнительные данные для расчета

Пиковая температура $t_{\text{п}}$, °С	-19	-15	-11	-7	-3	1	5	9	13
Установленная мощность базового источника $Q_{\text{б}}$, кВт	1000,0	897,4	794,9	692,3	589,7	487,2	384,6	282,1	179,5
Установленная мощность пикового источника $Q_{\text{п}}$, кВт	0,00	102,56	205,13	307,69	410,26	512,82	615,38	717,95	820,51
Суммарная установленная мощность, Q_{max} , кВт	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Коэффициент преобразования базового источника, $\eta_{\text{б}}$	2,00	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60
Коэффициент преобразования пикового источника, $\eta_{\text{п}}$	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88

табл. 2 и 3.

Результаты расчета представлены в виде графика (рис. 3), на котором отображено изме-

нение суммарных затрат в зависимости от выбора пиковой температуры. Из графика видно, что минимальные суммарные затраты соответ-

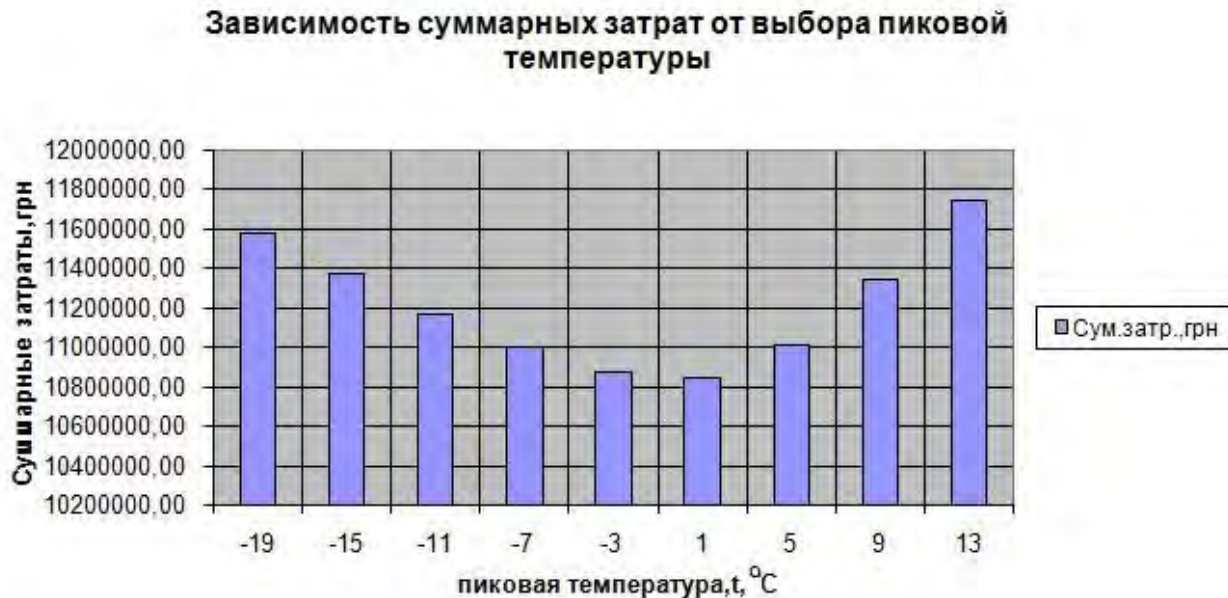


Рис. 3. К выбору оптимального распределения базовой и пиковой установленной мощности теплового насоса (базовый ТИ) и газового котла (пиковый ТИ).

ствуют пиковой температуре 1 °C, что соответствует (см. табл. 3) установленной мощности базового ТИ $Q_6 = 487$ кВт и установленной мощности пикового ТИ $Q_п = 513$ кВт, то есть соотношение $Q_6 / Q_{max} = 0,49$. Таким образом показано, что для принятых исходных данных оптимальная установленная мощность теплового насоса составляет 49 % от общей установленной мощности. При этом тепловой насос должен полностью обеспечивать отопительную нагрузку объекта до температуры наружного воздуха 1 °C. При более низких температурах наружного воздуха отопительную нагрузку целесообразно обеспечивать совместно тепловым насосом и газовым котлом. Установленная мощность газового котла должна составлять 51 % от общей установленной мощности.

Ниже проанализировано влияние различных факторов на оптимальное соотношение установленной мощности теплового насоса и газового котла:

- Цены электроэнергии;
- Величины удельных капитальных затрат на тепловой насос;
- Цены природного газа;

- Периода, за который оцениваются суммарные затраты;
- Климатических условий.

При увеличении цены природного газа и фиксированной цене электроэнергии (см. табл. 1) пиковая температура снижается, а соотношение Q_6 / Q_{max} увеличивается (табл. 4). Так увеличение цены природного газа с 0,30 до 0,40 грн./кВт·ч приведет к снижению пиковой температуры от 1 до -7 °C и повышению оптимальной установленной мощности теплового насоса с 49 до 69 %.

При снижении цены электроэнергии и фиксированной цене природного газа (см. табл. 1) пиковая температура понижается, а соотношение Q_6 / Q_{max} увеличивается (табл. 5). Так, снижение цены электроэнергии с 70 до 40 грн./кВт·ч приведет к снижению пиковой температуры от 1 до -7 °C и повышению оптимальной установленной мощности теплового насоса с 49 до 69 %.

При увеличении удельных капиталовложений на тепловой насос пиковая температура увеличивается, а соотношение Q_6 / Q_{max} снижается (табл. 6). Так увеличение удельных ка-

Табл. 4. Влияние цены природного газа

Цена природного газа, грн./кВт·ч	0,25	0,30	0,35	0,40
Цена природного газа, грн./1000 м ³	2170	2600	3040	3470
$t_{п}, ^\circ\text{C}$	9	1	-3	-7
$(Q_6/Q_{\max}) \cdot 100\%$	28	49	59	69

Табл. 5. Влияние цены электроэнергии

Цена электроэнергии, грн./кВт·ч	0,40	0,50	0,60	0,70
$t_{п}, ^\circ\text{C}$	-7	-7	-3	1
$(Q_6/Q_{\max}) \cdot 100\%$	69	69	59	49

Табл. 6. Влияние удельных капиталовложений на тепловой насос

Удельные капитальные затраты на тепловой насос, грн./кВт	2000,00	2500,00	4000,00	5000,00	6000,00	7000,00
$t_{п}, ^\circ\text{C}$	-3	1	1	5	9	13
$(Q_6/Q_{\max}) \cdot 100\%$	59	49	49	39	28	18

Табл. 7. Влияние периода проекта

Период проекта	7	11	12	15
$t_{п}, ^\circ\text{C}$	1	1	-3	-3
$(Q_6/Q_{\max}) \cdot 100\%$	49	49	59	59

питаловложений на тепловой насос с 2500 до 5000 грн./кВт приведет к увеличению пиковой температуры от 1 до 5 °С и снижению оптимальной установленной мощности теплового насоса с 49 до 39 %.

При увеличении периода, за который рассчитываются суммарные затраты, пиковая температура снижается, а соотношение Q_6/Q_{\max} увеличивается (табл. 7). Так увеличение периода проекта с 7 до 15 лет приведет к снижению пиковой температуры от 1 до -3 °С и повышению оптимальной установленной мощности теплового насоса с 49 до 59 %.

На выбор оптимальной мощности теплового насоса будет оказывать также влияние характер гистограммы распределения температур наружного воздуха за отопительный период. Смещение гистограммы в сторону более низких температур и снижение средней температуры наружного воздуха за отопительный период будет приводить к снижению пиковой температуры и повышению оптимальной установленной мощности теплового насоса. Так снижение средней температуры наружного воздуха за отопительный период от -1 до -2 °С приведет к снижению пиковой температуры от 1 до -3 °С и

увеличению оптимальной установленной мощности теплового насоса с 49 до 59 %.

Выводы

1. Рассмотрена технико-экономическая целесообразность использования комбинированных тепловых источников, включающих в себя базовый тепловой источник, который характеризуется высокой энергетической эффективностью и большими начальными капитальными затратами, и пиковый тепловой источник, который характеризуется относительно невысокой энергетической эффективностью и невысокими начальными капитальными затратами. В качестве базовых тепловых источников могут рассматриваться тепловые насосы, конденсационные котлы или котлы на биотопливе, а в качестве пиковых тепловых источников – традиционные газовые котлы или электродкотлы.

2. Сформулирована задача выбора оптимальной установленной мощности базового и пикового теплового источника. В качестве критерия оптимизации использована величина суммарных (капитальных и эксплуатационных) затрат за весь период эксплуатации оборудования. Введено понятие пиковой температуры – это такая температура наружного воздуха, выше которой тепловая нагрузка потребителя обеспечивается только базовым тепловым источником, а ниже которой – базовым и пиковым тепловыми источниками. Показано, что соотношение установленной мощности базового и пикового теплового источника однозначно связано с выбором пиковой температуры. Пиковая температура рассматривается как дискретная величина, которая может принимать определенное количество значений в интервале между расчетной температурой наружного воздуха для проектирования систем отопления и максимальной температурой за отопительный период. Предложен метод решения сформулированной задачи оптимизации путем полного перебора всех возможных значений пиковой температуры.

3. На базе использования предложенного метода выполнен расчет оптимального соотношения установленной мощности теплового насо-

са, который используется в качестве базового теплового источника и традиционного газового водогрейного котла, который используется в качестве пикового теплового источника. Показано, что при существующих ценах на оборудование, электроэнергию, природный газ и при характерной для г. Киева гистограмме распределения температур наружного воздуха в отопительный период оптимальная установленная мощность теплового насоса составляет 49% от общей установленной мощности. Выполнено численное моделирование влияния различных факторов на выбор оптимальной установленной мощности теплового насоса при работе его в комбинации с традиционным газовым водогрейным котлом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Долинский А.А., Басок Б.И., Базеев Е.Т.* Основные положения концепции Национальной стратегии теплообеспечения населенных пунктов Украины // *Промышленная теплотехника.* – 2009. – Т. 31, № 4. – С.68–78.

2. *Долинский А.А.* К вопросу эксерноэкономической оптимизации энергетических систем // *Промышленная теплотехника.* – 2009. – Т. 31, № 4. – С.105–108.

3. *Попырин Л.С., Светлов К.С., Беляева Г.М. и др.* Исследование систем теплоснабжения. – М.: Наука, – 1989. – 215 с.

4. *Клер А.М., Маринченко А.Ю., Потанина Ю.М.* Оптимизация теплофикационных теплоэнергетических установок // *Теплоэнергетика.* – 2009. – № 9. – С. 55–59.

5. *Никитин Е.Е.* Концепция управления энергоэффективностью систем теплоснабжения поселений // *Энерготехнологии и ресурсосбережение.* – №2. – С. 25–33.

6. *Межотраслевые нормы* потребления электрической и тепловой энергии для учреждений и организаций бюджетной сферы Украины. Укриндиинжпроект. Утверждено Приказом Государственного комитета Украины по энергосбережению 25.10.99. – №91. – Киев 2000, –104 с.

Получено 12.02.2010. г.