

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

УДК 620:621.31

Е.Е. НИКИТИН, канд. техн. наук,
Институт газа НАН Украины, г. Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ВОДОГРЕЙНЫМИ КОТЛАМИ

Разработана методика и выполнено расчетное исследование взаимосвязи между показателями экономической, энергетической эффективности, ценами на энергоресурсы, конструктивными и эксплуатационными характеристиками централизованных систем теплоснабжения с водогрейными котлами, работающими на природном газе. Результаты исследования могут быть использованы для проведения технико-экономического и финансового анализа различных вариантов рассматриваемых систем.

Ключевые слова: технико-экономическая эффективность централизованных систем теплоснабжения.

Теплоснабжение многих городов и населенных пунктов Украины осуществляется с помощью газовых водогрейных котельных и подключенных к ним квартальных или районных тепловых сетей.

Современное состояние коммунальной энергетики характеризуется проблемами [1], главными из которых являются непрерывный рост цен на природный газ, который является доминирующим видом топлива, значительный физический износ оборудования, прежде всего тепловых сетей, который приводит к наличию повышенных тепловых потерь, низкий уровень энергетической эффективности оборудования и качества услуг теплоснабжения, а также устойчивая, но неуправляемая тенденция отключения отдельных потребителей от централизованных тепловых сетей и массовый переход населения на индивидуальное отопление.

Аналізу техніко-економічної ефективності централизованих систем теплоснабження посвящено більше кількість робіт. Основи математичного моделювання і оптимізації систем теплоснабження закладені в роботах [2, 3]. Питання економіки систем теплоснабження детально освітлені в роботі [4], яка, однак, стосується періоду планової соціалістичної економіки.

Функціонування теплоснабжаючих підприємств в умовах ринкової економіки дик-

тує необхідність проведення техніко-економічних досліджень, які враховують сучасні реалії. Одним з ключових питань є встановлення справедливих цін на енергоресурси [5, 6]. Затрати на паливно-енергетичні ресурси є домінуючою статтею витрат теплоснабжаючих підприємств і основною складовою її собівартості виробленої теплової енергії.

Цілью нинішнього дослідження є встановлення кількісних взаємозв'язків між показателями економічної, енергетичної ефективності, цінами на енергоресурси, конструктивними і експлуатаційними характеристиками централизованих систем теплоснабження з водогрейними котлами, що працюють на природному газі.

Науково-методичною основою дослідження є побудова енергетичного балансу розглянутої системи, відомі методи її теплогідрравлічного розрахунку і використання загальнопотребительських показників економічної і енергетичної ефективності.

Розглянуті нижче методика і розрахунковий аналіз мають наближений характер, так як базуються на усереднених показателях за опітний період. Тем не менше, отримані результати можуть бути використані при порівнянні різних варіантів (технічних станцій) систем теплоснабження і сопоставленні рівнів цін на природний газ, елек-

трическую и тепловую энергию. Для принятия окончательных решений, касающихся проектирования, модернизации и ценообразования, необходимо выполнить более детальные расчеты и исследования предпочтительного варианта на основе действующих нормативно-методических материалов.

В настоящем исследовании выполнен анализ влияния таких факторов, как:

- отключение отдельных тепловых потребителей от сети;
- цена покупного топлива, электроэнергии и отпускаемой тепловой энергии;
- величина тепловых потерь в сетях;
- удельная протяженность тепловых сетей;
- коэффициент полезного действия (КПД) теплового источника.

Рассмотрим схему энергетических потоков системы теплоснабжения (рис.1), которая включает источник тепловой энергии 1, тепловую сеть 2, циркуляционную насосную установку 3 и тепловых потребителей 4.

E_m — количество энергии топлива, использованное в источнике тепловой энергии, кВт · ч; E_e — количество электроэнергии, использованное в источнике тепловой энергии, кВт · ч; E_k — количество тепловой энергии, отпущенное источником тепловой энергии, кВт · ч; $E_{k,ном}$ — тепловые потери в источнике тепловой энергии, кВт · ч; E_n — количество электроэнергии, использованное в циркуляционной насосной установке, кВт · ч; $E_{мп,ном}$ — потери тепловой энергии в тепловой сети, кВт · ч; E_n — количество тепловой энергии, поступившее к потребителю, кВт · ч.

Эти энергетические потоки могут быть рассмотрены на различных временных интервалах. Наиболее представительным временным интервалом для системы теплоснабжения является календарный год.

Оценка эффективности использования тепловой энергии топлива осуществляется на основании рассмотрения тепловых балансов (1)—(12):

теплового баланса системы в целом

$$E_n = E_m - E_{k,ном} - E_{мп,ном} = E_k - E_{мп,ном}, \quad (1)$$

теплового баланса теплового источника

$$E_k = E_m - E_{k,ном}, \quad (2)$$

теплового баланса тепловой сети

$$E_n = E_k - E_{мп,ном}. \quad (3)$$

Показателями эффективности использования тепловой энергии топлива являются КПД

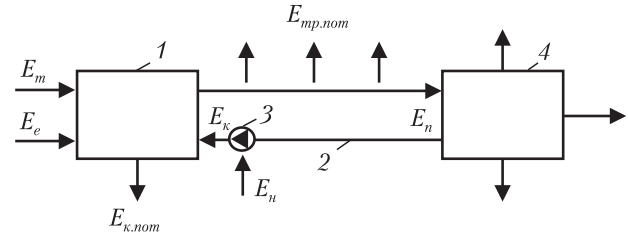


Рис.1 Схема системы теплоснабжения с энергетическими потоками

„брутто” $\eta_k^{бр}$ и относительные потери тепловой энергии q :

системы теплоснабжения в целом

$$\eta_{см}^{бр} = E_n / E_m = (E_m - E_{k,ном} - E_{мп,ном}) / E_m = 1 - q_{k,ном} - q_{мп,ном}, \quad (4)$$

источника тепловой энергии (котла)

$$\eta_k^{бр} = E_k / E_m = (E_m - E_{k,ном}) / E_m = 1 - q_{k,ном}, \quad (5)$$

тепловой сети:

$$\eta_{мс}^{бр} = E_n / E_k = (E_k - E_{мп,ном}) / E_k = (1 - q_{k,ном} - q_{мп,ном}) / (1 - q_{k,ном}). \quad (6)$$

Относительные тепловые потери в котле и трубопроводах определяются следующим образом:

$$q_{k,ном} = E_{k,ном} / E_m, \quad (7)$$

$$q_{мп,ном} = E_{мп,ном} / E_m. \quad (8)$$

Коэффициент полезного действия котельного агрегата с учетом расхода электрической и тепловой энергии на собственные нужды называется КПД „нетто”:

$$\eta_k^н = \eta_k^{бр} - q_{с.н}, \quad (9)$$

где $q_{с.н}$ — относительный расход электроэнергии и тепловой энергии на собственные нужды. Для водогрейного котла расход тепловой энергии на собственные нужды практически отсутствует, потому рассматриваемая величина может быть определена по формуле:

$$q_{с.н} = E_e / E_m. \quad (10)$$

По аналогии с котельной установкой введем в рассмотрение коэффициент полезного действия „нетто” системы теплоснабжения в целом:

$$\eta_{см}^н = E_n / (E_m + E_e + E_n) = (\eta_k^{бр} - q_{мп,ном}) / (1 + q_{с.н} + q_n). \quad (11)$$

где q_n — относительный расход электроэнергии на привод циркуляционных насосов, который определяется по формуле:

$$q_n = E_n / E_m. \quad (12)$$

Общепринятым критерием экономической эффективности производства продукции, в

том числе и энергетической, является рентабельность. Будем называть коэффициентом рентабельности, производства тепловой энергии в системе теплоснабжения отношение годовой прибыли от продажи тепловой энергии ΔC к годовым затратам на ее производство и транспортировку Z

$$R = \Delta C / Z. \quad (13)$$

Годовая прибыль от продажи тепловой энергии — это разность годового дохода C от продажи тепловой энергии и годовых затрат Z на ее производство и транспортировку

$$\Delta C = C - Z. \quad (14)$$

Основную долю затрат Z составляют энергетические затраты на топливо и электроэнергию $З$. Выразим общие затрат Z через энергетические затраты $З$ с помощью коэффициента дополнительных затрат

$$Z = \kappa З, \quad (15)$$

где κ — коэффициент дополнительных затрат.

Анализ хозяйственно-финансовой деятельности ряда теплоснабжающих организаций показывает, что структура себестоимости единицы тепловой энергии может быть охарактеризована следующими цифрами %: природный газ — 57,0; электроэнергия — 7,9; водоснабжение — 0,8; другие составляющие — 34,5. Таким образом, затраты на природный газ и электроэнергию составляют около 65–70% от общих затрат на производство тепловой энергии, поэтому можно принять, что $\kappa = 1,43–1,54$.

Введя в рассмотрение цену топлива, тепловой и электрической энергии c_m, c, c_e , грн./кВт ч, рентабельность производства тепловой энергии можно выразить через показатели энергетической эффективности системы теплоснабжения:

$$R = cE_n / \{ \kappa [E_m c_m + c_e (E_e + E_n)] \} - 1 = \\ = c (\eta_{\kappa}^{op} - q_{mp.nom}) / \{ \kappa [c_m + c_e (q_{c.n} + q_n)] \} - 1. \quad (16)$$

Величины, входящие в выражение (16), можно разделить на четыре группы:

цены на энергоносители c, c_m, c_e ;

характеристики энергетической эффективности котла $\eta_{\kappa}^{op}, q_{c.n}$;

характеристики энергетической эффективности тепловой сети $q_{mp.nom}, q_n$;

κ — характеристика дополнительных затрат на производство тепловой энергии по отношению к энергетической составляющей ее себестоимости.

С целью приведения всех параметров в формуле (16) к безразмерному виду вместо абсолютных значений цен на энергоносители целесообразно ввести в рассмотрение относительные цены (по отношению к стоимости топлива): $r = c/c_m$; $r_e = c_e/c_m$. Тогда выражение (17) примет вид

$$R = r (\eta_{\kappa}^{op} - q_{mp.nom}) / \{ \kappa [1 + r_e (q_{c.n} + q_n)] \} - 1. \quad (17)$$

Цены топлива и тепловой энергии, выраженные в грн./кВт · ч, могут быть пересчитаны на основании общеупотребительных единиц следующим образом:

$$c_m [zph./кВт · ч] = 0,859 c_m [zph./1000 м^3] / Q_n^p \eta_{\kappa}^{op};$$

$$c [zph./кВт · ч] = 0,859 \cdot 10^{-3} c [zph./Гкал].$$

где Q_n^p — теплотворная способность природного газа, ккал/м³.

Цены на энергоносители и характеристики дополнительных затрат могут быть заданы на основании текущих или прогнозных данных. Характеристики энергетической эффективности котла определяются на основании его паспортных характеристик или теплотехнических испытаний. Характеристики энергетической эффективности тепловых сетей, рассматриваемые в настоящей работе, $q_{mp.nom}, q_n$ являются недостаточно изученными величинами, потому ниже они рассматриваются более детально.

С учетом формул (4), (5), (8), (12) выражения для $q_{mp.nom}$ и q_n могут быть представлены в виде:

$$q_{mp.nom} = \eta_{\kappa}^{op} \Delta Q / (\Delta Q + \alpha Q); \quad (18)$$

$$q_n = \Delta N (\eta_{\kappa}^{op} - q_{mp.nom}) / \alpha Q, \quad (19)$$

где ΔQ — среднегодовая мощность тепловых потерь в системе теплоснабжения, кВт; Q — присоединенная тепловая нагрузка, кВт; ΔN — электрическая мощность циркуляционного насоса, кВт; α — коэффициент, который характеризует отношение среднегодовой и присоединенной тепловой мощности потребителей:

$$\alpha = (t_{e.n} - t_{cp.o}) / (t_{en} - t_{p.o}),$$

где $t_{e.n}$ — температура воздуха в помещении; $t_{cp.o}$ — средняя температура наружного воздуха, $t_{p.o}$ — расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы отопления.

Величины $Q, \Delta Q$ и ΔN могут быть определены на основании теплогидравлического расчета конкретной системы теплоснабжения.

Рассмотрим упрощенную схему системы теплоснабжения (рис.2), которая включает в

себя источник тепловой энергии I , потребителей тепловой энергии $\Pi_1, \Pi_2, \dots, i, \dots, \Pi_n$ и тепловую сеть, которая условно состоит из шести участков ($1, 2, \dots, k, \dots, m$).

Характеристики потребителей и участков тепловой сети представлены в табл. 1, 2.

$$G_i = Q_i / c_p \Delta t, \quad (20)$$

$$\Delta P_k = \Delta P_1 + \Delta P_m, \quad (21)$$

где c_p — теплоемкость воды, кДж/кг °С; Δt — разность температур воды в подающем и обратном трубопроводах; $\Delta P_1, \Delta P_m$ — потеря давления по длине и в местных сопротивлениях участка, кПа.

Теплогидравлический расчет тепловой сети, включая определение величин $\Delta P_k, G_k, d_k, \Delta Q_k$, может быть выполнен на основании рекомендаций [7].

Затраты электроэнергии для прокачки теплоносителя по k -му участку, кВт определяются по формуле:

$$\Delta N_k = 2G_k \Delta P_k / \eta_n \rho, \quad (22)$$

где η_n — КПД циркуляционного насоса; ρ — плотность воды, кг/м³.

Суммарные потери тепловой энергии в тепловой сети и мощность циркуляционного насоса определяются как сумма соответствующих величин на отдельных участках:

$$\Delta Q = \sum \Delta Q_k, \quad (23)$$

$$\Delta N = \sum \Delta N_k. \quad (24)$$

Помимо формул (23) и (24), которые характеризуют энергетические потери и затраты по

Таблица 1

Показатель	Номер потребителя					
	1	2	...	i	...	n
Присоединенная тепловая нагрузка, кВт	Q_1	Q_2	...	Q_i	...	Q_n
Расход теплоносителя, кг/с	G_1	G_2	...	G_i	...	G_n

Таблица 2

Показатель	Номер участка тепловой сети				
	1	...	k	...	m
Потеря давления, КПа	ΔP_1	...	ΔP_k	...	ΔP_m
Расход теплоносителя, кг/с	G_1	...	G_k	...	G_m
Диаметр участка, м	d_1	...	d_k	...	d_m
Тепловые потери, кВт	ΔQ_1	...	ΔQ_k	...	ΔQ_m

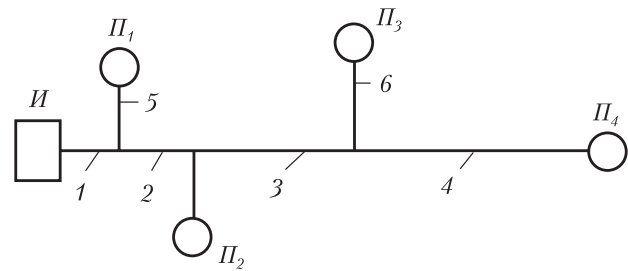


Рис. 2 Схема системы теплоснабжения

системе теплоснабжения в целом, целесообразно ввести в рассмотрение аналогичные величины, относящиеся к конкретному i -му тепловому потребителю (25), (26), что даст возможность оценить влияние отключения отдельных потребителей на энергетическую и экономическую эффективность рассматриваемого объекта.

Затраты электроэнергии ΔN_i и тепловые потери ΔQ_i , отнесенные к i -му потребителю, можно определить следующим образом соответственно:

$$\Delta N_i = 2G_i (\sum \Delta P_{k(i)}) / \eta_n \rho, \quad (25)$$

$$\Delta Q_i = \sum Q_{ik}, \quad (26)$$

где $\sum \Delta P_{k(i)}$ — это сумма потерь давления на участках тепловой сети, которые составляют путь теплоносителя от источника до i -го потребителя; ΔQ_{ik} — потери тепловой энергии на k -м участке, отнесенные к i -му потребителю

$$\Delta Q_{ik} = \Delta Q_k G_{i(k)} / (\sum G_i - \sum G_{i-j}), \quad (27)$$

где $G_{i(k)} = G_i$, если k -й участок находится по ходу теплоносителя до i -го потребителя; $G_{i(k)} = 0$, если k -й участок находится по ходу теплоносителя после i -го потребителя; $\sum G_i - \sum G_{i-k}$ — сумма расходов теплоносителя ко всем потребителям за вычетом тех, которые находятся до k -го участка по ходу теплоносителя.

Для анализа энергетической эффективности каждого отдельного потребителя целесообразно рассмотреть величину β_i , которая представляет собой долю затрат электрической энергии на прокачку теплоносителя и потерь тепловой энергии в тепловых сетях по отношению к среднегодовой тепловой нагрузке конкретного потребителя

$$\beta_i = (\Delta N_i + \Delta Q_i) / \alpha Q_i. \quad (28)$$

Энергетическая эффективность системы в целом может быть охарактеризована:

$$\beta = \sum (\Delta N_i + \Delta Q_i) / \sum \alpha Q_i. \quad (29)$$

Целесообразно также отдельно проанализировать долю затрат электрической энергии и долю потерь тепловой энергии соответственно

$$\beta_e = \Sigma \Delta N_i / \Sigma \alpha Q_i, \quad (30)$$

$$\beta_t = \Sigma \Delta Q_i / \Sigma \alpha Q_i. \quad (31)$$

Выполним численное моделирование гидравлических, тепловых и технико-экономических параметров для упрощенной тепловой сети, показанной на рис. 2. Все расчеты выполняли с помощью электронных таблиц Microsoft Excel 2003. Общие исходные данные приведены ниже.

Теплоемкость воды c_p , Кдж/кг °С	4,19
Плотность воды ρ , кг/м ³	975
Среднегодовая температура в подающем трубопроводе t_1 , °С	90
Среднегодовая температура в обратном трубопроводе t_2 , °С	50
Цена электроэнергии c_e , грн./кВт · ч	0,70
Цена природного газа c_m , грн./1000м ³	2600
Цена природного газа c_m , грн./кВт · ч	0,30
Цена отпускаемой тепловой энергии s , грн./Гкал	750
Цена отпускаемой тепловой энергии s , грн./кВт · ч	0,65
Теплотворная способность природного газа Q_n^p , кал/нм ³	8200
КПД котельной „брутто” $\eta_k^{бр}$	0,90
Относительный расход энергии на собственные нужды котла $q_{с.н}$	0,02
КПД циркуляционной насосной установки η_n	0,70
Температура внутри помещения $t_{вн}$, °С	20
Средняя температура наружного воздуха в отопительный период $t_{ср.о}$, °С	1,1
Расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы отопления $t_{р.о}$, °С	-22
Коэффициент дополнительных затрат κ	1,5
Коэффициент, характеризующий шероховатость труб [1] A_d^g , м ^{0,62} /кг ^{0,19}	0,121
Коэффициент теплопроводности теплоизоляции $\lambda_{из}$, Вт/м К	0,05

Данные характеристик участков тепловой сети приведены в табл. 3, а технико-экономические показатели потребителей — в табл. 4. В табл. 3 коэффициент местных сопротивлений равен 0.

Анализируя результаты численного моделирования технико-экономических характеристик тепловой сети (табл. 4), конфигурация которой показана на рис. 2, можно отметить следующее: доля суммарных затрат электрической энергии на транспортировку теплоносителя и потерь тепловой энергии в тепловых сетях по отношению к среднегодовой тепловой нагрузке для системы в целом (показатель β) составляет 10 %. При

этом основной „вклад” вносят тепловые потери (9,5 %). Затраты электрической энергии составляют незначительную величину (около 0,5 %) доля затрат электрической энергии на транспортировку теплоносителя и потерь тепловой энергии в тепловых сетях по отношению к среднегодовой тепловой нагрузке для различных потребителей (показатель β_i) изменяется в широком диапазоне от 4% (потребитель № 1) до 35 % (потребитель № 4); рентабельность производства тепловой энергии в рассматриваемой системе составляет 8 %.

Проанализируем влияние различных факторов на рассмотренные выше энергетические и экономические показатели системы теплоснабжения.

Отключение отдельных тепловых потребителей от сети. Вычислив величину β_i (28) для всех потребителей и проранжировав их в порядке возрастания можно получить список приоритетности отключения отдельных потребителей от централизованной системы теплоснабжения. Вначале списка будут находиться потребители, отключение которых наименее целесообразно, а в конце списка будут находиться потребители, отключение которых принесет наименьший ущерб, а возможно и повысит экономическую эффективность работы теплоснабжающего предприятия.

Наибольший показатель β_i имеет потребитель №4, потому целесообразно рассмотреть каким образом изменятся технико-экономические показатели системы теплоснабжения при отключении этого потребителя (табл. 5).

Как видно из сопоставления таблиц 4 и 5, отключение удаленного потребителя №4 приведет к снижению относительных энергетических потерь с 10 до 7 % и увеличению рентабельности производства тепловой энергии с 8 до 14 %.

Выполним аналогичный анализ для потребителя № 3. При отключении этого потребителя доля энергетических потерь увеличится по сравнению с базовым вариантом (табл. 4) с 10 до 11 %, а рентабельность производства тепловой энергии снизится с 8 до 6 %.

Проведенный анализ показывает, что отключение отдельных потребителей может как улучшать, так и ухудшать энергетические и экономические характеристики централизованной системы теплоснабжения, поэтому принятие соответствующего решения должно осуществляться на основании технико-экономических расчетов.

Таблица 3

Показатель	Участок тепловой сети						
	1	2	3	4	5	6	7
Расход, кг/с	23,87	11,93	7,16	2,98	11,93	4,18	4,77
Длина, м	500	600	400	2000	700	600	400
Диаметр, м	0,176	0,135	0,111	0,08	0,102	0,07	0,07
Удельное падение давления, Па/м	80	80	80	80	343	267	480
Потеря давления, Па	40000	48000	32000	160000	240000	160000	192000
Толщина теплоизоляции, мм	50	45	45	35	45	45	32
Удельные тепловые потери, Вт/м	98,5	86,8	74,8	70,2	70,3	54,7	66,5
Тепловые потери, кВт	49,3	50,1	29,9	140,3	49,2	32,7	26,6
Тепловые потери, отнесенные к потребителю 1, кВт	24,6	0	0	0	49,2	0	0
Тепловые потери, отнесенные к потребителю 2, кВт	9,9	20,8	0	0	0	0	26,6
Тепловые потери, отнесенные к потребителю 3, кВт	8,6	18,2	17,4	0	0	32,8	0
Тепловые потери, отнесенные к потребителю 4, кВт	6,2	13,0	12,5	140,4	0	0	0

Таблица 4

Технико-экономический показатель	Номер потребителя				Показатель по системе
	1	2	3	4	
Q_i , кВт	2000	800	700	500	4000
G_i , кг/с	11,93	4,77	4,18	2,98	23,86
$\Sigma \Delta P_{k(i)}$, кПа	280	280	280	280	—
ΔN_i , кВт	9,79	3,92	3,43	2,45	19,59
ΔQ_i , кВт	73,83	57,28	77,09	171,99	380,19
β_i	0,04	0,08	0,12	0,35	0,10
$q_{тр.пот}$	—	—	—	—	0,14
q_H	—	—	—	—	0,007
R	—	—	—	—	0,08

Таблица 6

Параметр	Значение параметра				
	600	700	750	800	900
Цена тепловой энергии, грн./Гкал	600	700	750	800	900
R, %	-19	-6	0	8	21
Цена топлива, грн./1000м ³	2000	2600	2830	3000	3500
R, %	29	0	-7	-12	-24
Цена электроэнергии, грн./кВт ч	0,20	0,40	0,70	1,00	1,40
R, %	5	3	0	-2	-5
$\lambda_{из}$, Вт/м К	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10
$q_{тр.пот}$, %	9	14	19	23	25
R, %	7	0	-5	-10	-13
ΣQ_i , кВт	2000	2500	4000	6000	8000
$L/\Sigma Q_i$, км/МВт	2,8	2,2	1,4	0,9	0,7
$q_{тр.пот}$, %	21	19	14	11	9
q_H , %	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
R, %	-8	-5	0	5	7
$\eta_{кбр}$, %	70	80	87	90	100*
R, %	-38	-20	-6	0	24

Таблица 5

Технико-экономический показатель	Номер потребителя				Показатель по системе
	1	2	3	4	
Q_i , кВт	2000	800	700	—	3500
G_i , кг/с	11,93	4,77	4,18	—	20,88
$\Sigma \Delta P_{k(i)}$, кПа	128	128	128	—	—
ΔN_i , кВт	4,48	1,79	1,57	—	7,83
ΔQ_i , кВт	77,34	65,63	96,86	—	239,83
β_i	0,04	0,08	0,14	—	0,07
$q_{тр.пот}$	—	—	—	—	0,11
q_H	—	—	—	—	0,04
R	—	—	—	—	0,14

Цена отпускаемой тепловой энергии. Очевидно, что с уменьшением цены отпускаемой тепловой энергии рентабельность ее производства будет снижаться (табл. 6). Будем называть критической такую цену тепловой энергии, при которой рентабельность ее производства равна нулю. Для рассматриваемой системы и

* — при использовании конденсационных котлов

заданных исходных данных (стр. 36) критическая цена составляет 750 грн./Гкал. Если цена отпускаемой тепловой энергии будет ниже критической, то при указанных ценах на природный газ и электроэнергию рассматриваемое производство будет убыточным.

Цена топлива. Влияние цены природного газа на рентабельность производства тепловой энергии при фиксированной цене тепловой энергии проиллюстрировано данными табл. 6. Критическая цена природного газа, при которой рентабельность равна нулю, составляет 2600 грн./1000 м³ (при стоимости тепловой энергии 750 грн./Гкал). Если цена природного газа

будет превышать указанную величину, то производство тепловой энергии при фиксированной ее цене станет убыточным. Снижение цены природного газа с 2600 до 2000 грн./1000 м³ (на 23 %) увеличивает рентабельность до 29 %. Это указывает на то, что основным путем повышения технико-экономической эффективности систем теплоснабжения является переход на более дешевые виды топлива, в частности местные виды топлива.

Цена электроэнергии. Изменение цены электроэнергии оказывает существенно меньшее влияние на рентабельность производства тепловой энергии, чем изменение цены топлива. Так, увеличение цены электроэнергии в семь раз (с 0,2 до 1,40 грн./кВт · ч) приводит к снижению рентабельности производства тепловой энергии с -5 до 5 %, то есть на 10 % (табл. 6). Это объясняется тем, что затраты электроэнергии составляют всего около 2,5 % от первичной энергии топлива, которое затрачивается на производство тепловой энергии.

Состояние теплоизоляции трубопроводов. Состояние материала тепловой изоляции трубопроводов может существенно изменяться в процессе эксплуатации тепловых сетей, в результате чего будет увеличиваться коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала. Для современных теплоизоляционных материалов можно принять $\lambda_{из} = 0,05$ Вт/м К. Из приведенных данных (табл. 6) видно, что ухудшение теплоизоляционных свойств трубопроводов в два раза с 0,05 до 0,1 Вт/м К будет приводить к увеличению относительных тепловых потерь с 14 до 25 %, при этом рентабельность производства тепловой энергии будет снижаться с 0 до -13 %.

Плотность расположения тепловых потребителей. Суммарная присоединенная мощность тепловых потребителей системы теплоснабжения, показанная на рис. 2, составляет 4000 кВт, а общая протяженность тепловых сетей — 5,2 км. Плотность расположения тепловых потребителей может быть охарактеризована отношением общей протяженности тепловых сетей к суммарной присоединенной тепловой мощности. Для рассматриваемой тепловой сети этот показатель составляет $L/\Sigma Q_i = 1,4$ км/МВт. Проведем численный эксперимент, который заключается в том, что мощность присоединенных тепловых потребителей будет пропорционально изменяться в диапазоне от 2 до 8 МВт. При этом про-

тяженности отдельных участков остаются неизменными, а диаметры этих участков изменяются соответственно с присоединенной тепловой мощностью. Соответствующие изменения технико-экономических характеристик системы теплоснабжения представлены в табл. 6. Из приведенных данных видно, что удельная протяженность тепловых сетей оказывает существенное влияние на технико-экономические характеристики системы теплоснабжения. Так, снижение удельной протяженности от 2,8 до 0,7 км/МВт приводит к снижению удельных тепловых потерь с 21 до 9 % и увеличению рентабельности с -8 до 7 %. При этом удельные затраты электроэнергии на транспортировку теплоносителя практически не изменяются. Критическая удельная протяженность тепловых сетей, при которой рентабельность производства тепловой энергии при существующих ценах на природный газ и электроэнергию (см. исходные данные на стр. 36) близка к нулю, составляет около 1,4 км/МВт.

КПД теплового источника. Как видно из приведенных данных (табл.6), КПД теплового источника оказывает существенное влияние на рентабельность производства тепловой энергии. Снижение КПД на 10 % с 90 до 80 % приводит к снижению рентабельности производства тепловой энергии с 0 до -20 %, то есть на 20 %. Для рассматриваемой тепловой сети (рис. 2) при существующих ценах на природный газ и электроэнергию (см. исходные данные на стр. 36) критическое значение КПД теплового источника, при котором рентабельность производства тепловой энергии близка к нулю, составляет 90 %.

Разработанная технико-экономическая модель позволяет оценить влияние и других факторов на показатели энергетической и экономической эффективности тепловой сети, а именно: длины отдельных участков и их диаметры, КПД насосной установки, среднегодовая температура наружного воздуха, „недотопы” и „перетопы” у тепловых потребителей, теплотворная способность топлива, коэффициент дополнительных затрат.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика и выполнено расчетное исследование взаимосвязи между показателями экономической, энергетической

эффективности, ценами на энергоресурсы, конструктивными и эксплуатационными характеристиками централизованных систем теплоснабжения с водогрейными котлами, работающими на природном газе.

2. На примере простейшей системы теплоснабжения выполнено численное моделирование влияния таких факторов, как отключение отдельных тепловых потребителей от сети, цены топлива, электроэнергии и отпускаемой тепловой энергии, величины тепловых потерь в сетях, удельной протяженности тепловых сетей и КПД теплового источника на показатели энергетической эффективности и рентабельность производства тепловой энергии. Вычислены критические значения влияющих параметров, при которых обеспечивается нулевой уровень рентабельности производства тепловой энергии при существующих ценах на природный газ и электрическую энергию.

3. Результаты исследования могут быть использованы для проведения технико-экономического и финансового анализа различных вариантов систем теплоснабжения.

1. *Євтухова Т.О., Симборський А.І.* Сучасний стан комунальної енергетики України / Проблеми загальної енергетики. — 2008. — № 17. — С. 31–36.
2. *Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения* / Меренков А.П., Сеннова Е.В., Сумароков С.В., Сидлер В.Г.; Отв. ред. А.П. Меренков; Рос. АН. Сиб. отд-ние. Сиб. энерг. ин-т им. Л.А. Мелентьева. — Новосибирск: Наука, 1992. — 406 с.
3. *Исследование систем теплоснабжения* / Попырин Л.С., Светлов К.С., Беляева Г.М. и др. — М.: Наука, 1989. — 215 с.
4. *Богуславский Л.Д., Симонова А.А., Митин М.Ф.* Экономика теплогазоснабжения и вентиляции: Учебн. для вузов / 3-е изд., перераб и доп.— М.: Стройиздат, 1988.— 351 с.
5. *Кулик М.М., Кобрін П.П.* Основні напрями діяльності у сфері підвищення енергетичної ефективності / Проблеми загальної енергетики. — 2007. — № 16. — С. 7–10.
6. *Новосельцев О.В., Євтухова Т.О.* Концептуальні засади, метод і модель системного регулювання цін і тарифів на енергоємні ресурси, продукти та послуги. / Проблеми загальної енергетики.— 2007. — № 16.— С. 21–27.
7. *Водяные тепловые сети: Справочное пособие по проектированию* / Беляйкина И.В., Витальев В.П., Громов Н.К. и др.: Под. ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 376 с.