

УДК 697.34

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ С УЧЁТОМ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ

ЗБАРАЗ Л. І.¹, к. т. н., доц.,

ПАВЛОВА В. Г.², к. т. н., н. с., асист.

¹ Кафедра теплотехники и энергоэффективных технологий, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, 61002, Харьков, Украина, тел. +38 (0577) 707-69-23 e-mail Zbaraz_Len@ukr.net ORCID ID 0000-0003-2912-0375

² Кафедра теплотехники и энергоэффективных технологий, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, 61002, Харьков, Украина, тел. +38 (0577) 707-69-23, e-mail paviktory@ukr.net, ORCID ID 0000-0002-1966-4945

Аннотация. Постановка проблемы. В последнее время в связи со значительным подорожанием энергоресурсов снижение прямых затрат на теплоснабжение становится приоритетной проблемой. В работе коммунальных предприятий особую актуальность приобретает оптимизация работы энергетического оборудования системы теплоснабжения, направленная на снижение прямых затрат. **Научная новизна.** В результате проведенных исследований получен закон изменения напора на источнике при качественно-количественном методе регулирования. **Результаты.** Разработана математическая модель работы разветвленной тепловой сети децентрализованного источника теплоснабжения, с помощью которой проанализированы различные методы регулирования тепловой нагрузки и найден оптимальный.

Ключевые слова: математическое моделирование, тепловая сеть, метод регулирования, температурный график, напор на источнике

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ

ЗБАРАЗ Л. І.¹, к. т. н., доц.,

ПАВЛОВА В. Г.², к. т. н., н. с., асист.

¹ Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (0577) 707-69-23 e-mail Zbaraz_Len@ukr.net ORCID ID 0000-0003-2912-0375

² Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (0577) 707-69-23 e-mail paviktory@ukr.net ORCID ID 0000-0002-1966-4945

Анотація. Постановка проблеми. Останнім часом у зв'язку зі значним подорожанням енергоресурсів зниження прямих витрат на тепlopостачання стає пріоритетною проблемою. У роботі комунальних підприємств особливої актуальності набуває оптимізація роботи енергетичного устаткування системи тепlopостачання, спрямована на зниження прямих витрат. **Наукова новизна.** У результаті проведених досліджень отримано закон зміни напору на джерелі за якісно-кількісного методу регулювання. **Результати.** Розроблено математичну модель роботи розгалуженої теплової мережі децентрализованого джерела тепlopостачання, за допомогою якої проаналізовано різні методи регулювання теплового навантаження і знайдено оптимальний.

Ключові слова: математичне моделювання, тепла мережа, метод регулювання, температурний графік, напір на джерелі

MATHEMATICAL MODELLING OF OPERATION HEAT NETWORKS IN VIEW OF HEAT LOSS

ZBARAZ L. I.¹, Ph. D., Ass. Prof.

PAVLOVA V. G.², Ph. D., Asist., research scientist.

¹ Department of Thermal Engineering and Energy-Efficient Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», st. Frunze, 21, 61002 Kharkov, Ukraine. Tel. +38 (0577) 707-69-23 e-mail Zbaraz_Len@ukr.net ORCID ID 0000-0003-2912-0375

² Department of Thermal Engineering and Energy-Efficient Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», st. Frunze, 21, 61002 Kharkov, Ukraine. Tel. +38 (0577) 707-69-23 e-mail paviktory@ukr.net ORCID ID 0000-0002-1966-4945

Annotation. Goal. In recent years, due to a significant rise in price of energy, the reduction of direct costs for heating becomes a priority. In the utilities especially important to optimization of energy heating system equipment. During transport of thermal energy in the distribution networks thermal losses occur along the length of the hydraulic pipes and the coolant pumping losses. These loss-dependence of the particular distribution network. Changing

temperature and the hydraulic regime at the source necessary to achieve the minimum cost of transport for today acting tariffs for energy. **Scientific novelty.** The studies received law changes head to the source at the qualitative and quantitative methods of regulation. **Results.** A mathematical model of an extensive network of decentralized heat source heating, which are analyzed using different methods of regulating and found the best.

Keywords: *mathematical modeling, thermal network, control method, temperature schedule, head to the source*

Введение. Наличие протяжённых тепловых сетей и большого числа потребителей делает актуальным вопрос о регулировке тепловой нагрузки с учётом тепловых потерь по длине теплотрассы. Удалённость источника теплоснабжения от потребителей тепла приводит к тому, что тепловые потери могут достигать 20...25 % от подключённой тепловой нагрузки. Следовательно, при подборе элеваторных узлов и сужающих устройств необходимо учитывать не только гидравлические потери по длине трубопроводов, но и тепловые потери через тепловую изоляцию сети.

Компенсировать тепловые потери можно следующими способами [2]:

1) увеличением температуры в подающем трубопроводе (качественный метод регулирования);

2) увеличением расхода теплоносителя на источнике (количественный метод регулирования);

3) увеличением и температуры, и расхода теплоносителя в системе теплоснабжения (качественно-количественный метод регулирования).

В любом случае расход теплоносителя у потребителей будет выше расчётного.

Цель и задачи - разработать математическую модель системы теплоснабжения, с помощью которой исследовать прямые затраты теплоснабжающих организаций и методы регулирования тепловой нагрузки и выбрать оптимальный.

Научная новизна. В литературе достаточно хорошо освещены вопросы регулировки расхода и температур теплоносителя от температуры наружного воздуха [2-4; 6-8].

Вместе с тем для регулировки гидравлического режима необходимо задать закон изменения напора на источнике. Определена зависимость изменения напора на источнике от температуры наружного

воздуха при качественно-количественном методе регулирования.

Изложение материала. Рассмотрим реальную систему теплоснабжения в пос. Большая Рогань, от котельной по ул. Ленина, 66, Харьковского района Харьковской области [1] с одним источником и 18 потребителями, подключёнными по трём контурам тепловых сетей, отходящим непосредственно от источника (рис. 1).

При тепловой нагрузке 2,82 Гкал/час и тепловых потерях в сетях 13,67 %, расход теплоносителя при качественном методе регулирования и температурном графике 95-70°C увеличивается с 112,8 м³/час до 128,22 м³/час. Этот дополнительный расход 15,42 м³/час необходимо компенсировать у потребителей. Здесь может быть два подхода к вопросу регулирования:

1) увеличить расход пропорционально подключённой нагрузке, независимо от удаления потребителя от источника;

2) увеличить расход через потребителя пропорционально подключённой нагрузке с учётом удаления от источника и способа прокладки тепловых сетей.

На наш взгляд, правильным будет второй метод, поскольку тепловые потери в сети зависят от протяжённости и способа прокладки, а не от подключённой нагрузки. Таким образом, регулировка системы теплоснабжения включает в себя расчёт тепловых потерь по длине трубопроводов и корректировку расхода у каждого потребителя.

Перечень потребителей с указанием тепловой нагрузки каждого приведен в таблице 1. Расчёт тепловых потерь по длине трубопроводов выполнен на основании МУ 34-70-080-84 [5].

Расчётные потери до потребителей (табл. 1) определены отдельно для каждого участка трубопровода (с учетом способа прокладки, вида тепловой изоляции и т. д.)

Анализ схемы подключения каждого потребителя дает возможность увеличивать расход (или нагрузку) пропорционально нагрузке данного потребителя.

Так, например, тепловые потери в крыле 3 на участке между котельной и ТК15 распределяются между тремя потребителями пропорционально их

нагрузке. Тепловые потери на участке между ТК15 и ТКА распределяются между двумя потребителями пропорционально нагрузке. Тепловые потери между ТКА и ж/д по ул. Ленина, 72 суммируются с тепловой нагрузкой дома. По такому же принципу определён расход системы отопления остальных потребителей.

Схема теплоснабжения с. Рогань, кот. ул. Ленина, 66

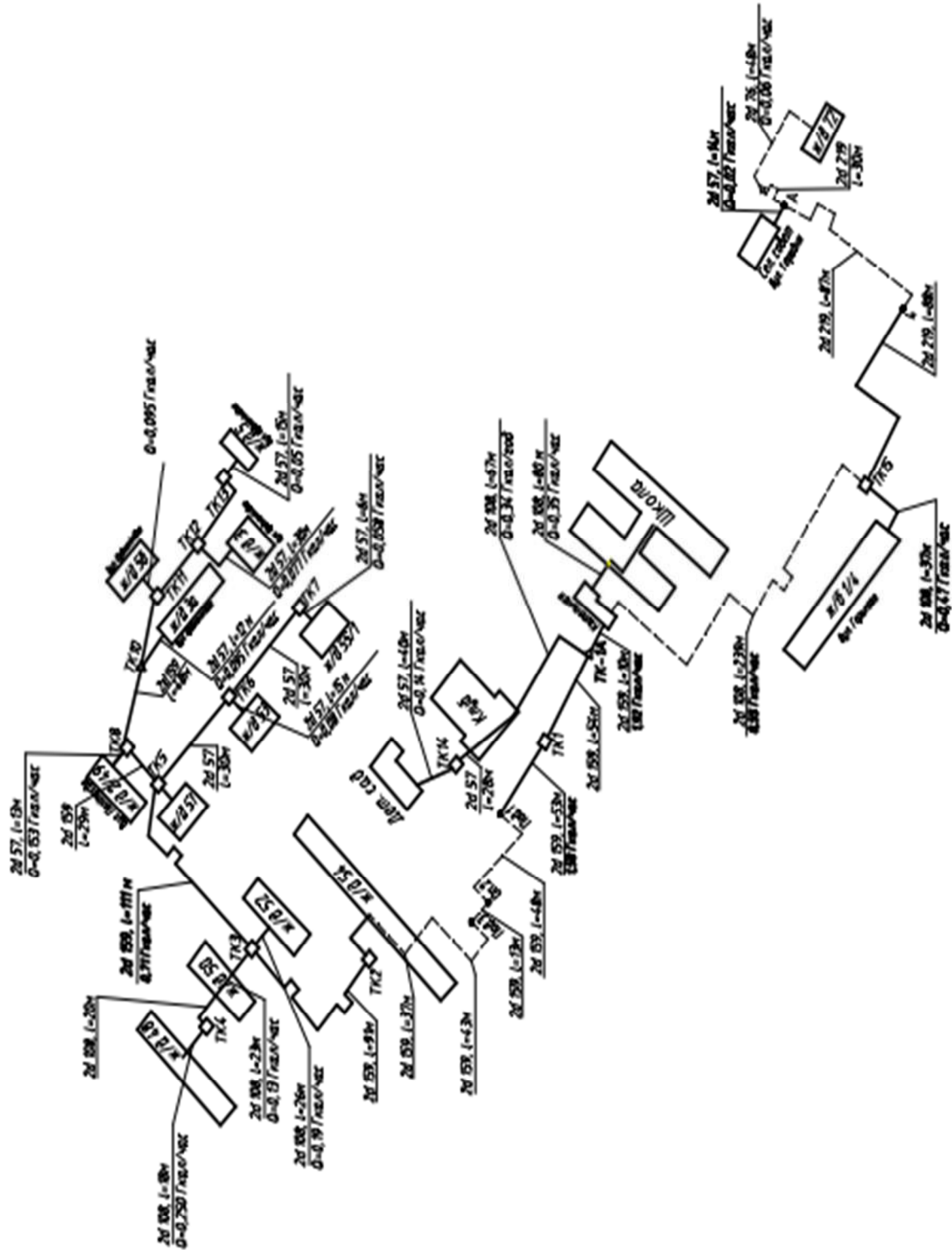


Рис. 1. Схема теплоснабжения с. Большая Рогань

Таблиця 1

Перечень потребителей с указанием нагрузки и тепловых потерь

№ п/п	Объект	Подключённая нагрузка, Гкал/час	Потери, Гкал/час	Нагрузка с потерями, Гкал/час	Расход, м ³ /час	Расчётные потери до потребителя, Гкал/час
	Крыло 1					
1	ул. Ленина, 66, (школа)	0,35	0,0067	0,3567	14,27	0,00672
	Крыло 2					
	Кот-ТК1а	1,92	0,0564	2,0574	85,06	0,00168
	ТК1а-БК	0,34	0,0088	0,3488	14,44	0,00885
2	ул. Ленина, 60. Клуб	0,2	0,0053	0,2053	8,21	
3	ул. Ленина, 60 ДНЗ	0,14	0,0157	0,1557	6,23	0,01226
	ТК1а-Ленина, 54	1,58	0,0459	1,6259	70,62	0,04672
4	ул. Ленина, 54	0,3	0,0090	0,3090	12,36	
	ул. Ленина, 54-ТК3	1,28	0,0250	1,3050	58,26	0,02548
5	ТК3 - ул. Ленина, 52	0,19	0,0153	0,2053	8,21	0,00623
	ТК3 - ул. Ленина, 50	0,38	0,0055	0,3855	16,53	0,00551
6	ул. Ленина, 50	0,13	0,0083	0,1383	5,53	
7	ул.Ленина, 50 - ул.Ленина,48	0,25	0,0249	0,2749	10,99	0,00911
	ТК3 - ТК5	0,71	0,0311	0,7411	33,53	0,03108
8	ул. Ленина, 51	0,07	0,0084	0,0784	3,14	0,00198
	ТК5 - ТК6	0,17	0,0054	0,1754	8,00	0,00541
9	ТК6 - ул. Ленина, 53	0,08	0,0125	0,0925	3,70	0,00270
10	ТК6-ул. Ленина, 55/1	0,09	0,0175	0,1075	4,30	0,00649
	ТК5-ТК8	0,47	0,0081	0,4781	22,39	0,00812
11	ул. Полетаева, 2/49	0,153	0,0190	0,1720	6,88	0,00234
	ТК8 - ТК10	0,277	0,0081	0,2851	15,51	0,00812
12	ТК10 - ул. Орджоникидзе, 3а	0,095	0,0152	0,1102	4,41	0,00216
	ТК10 - ТК11	0,132	0,0013	0,1333	11,10	0,00126
13	ТК11 - ул.Орджоникидзе, 5б	0,095	0,0202	0,1152	4,61	0,00631
	ТК11 - ТК12	0,127	0,0045	0,1315	6,49	0,00451
14	ТК12 - ул. Орджоникидзе, 3	0,077	0,0194	0,0964	3,85	0,00541
15	ТК12 - ул. Орджоникидзе, 5	0,05	0,0158	0,0658	2,63	0,00685
	Крыло 3	0,55	0,1733	0,7233	28,93	
	Кот – ТК15	0,55	0,0713	0,6213	28,93	0,07130
16	ТК15 - ул. Горького, 1/4	0,47	0,0685	0,5385	21,54	0,00887
	ТК15 - А	0,08	0,0652	0,1452	7,39	0,06517
17	ул. Ленина, 72	0,06	0,0823	0,1423	5,69	0,02231
18	ул. 1 Мая, 2	0,02	0,0225	0,0425	1,70	0,00252
	Всего:	2,820	0,3855	3,2055	128,22	0,3855
	Потери, %		13,67			

Для исследования прямых затрат теплоснабжающей организации рассмотрим методы регулирования тепловой нагрузки.

На наш взгляд, существующий сегодня в отечественном теплоснабжении классический метод качественного регулирования по температурному графику 95–70 С (безэлеваторное подключение) или на

перегретой воде (150–70 С ...115–70 С) [6] требует экономического обоснования для каждой конкретной тепловой схемы. Необходимо подобрать такой метод регулирования и температурный график, чтобы суммарные затраты З (прямые затраты на транспортировку [2; 6]) были минимальными:

$$Z = Z_m + Z_s \rightarrow \min. \quad (1)$$

Затраты топлива на компенсацию тепловых потерь между источником и потребителями Z_m , грн:

$$Z_m = (P_n + P_{об}) \cdot U_z \cdot C_z. \quad (2)$$

Затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя Z_s , грн:

$$Z_s = \frac{G \cdot h}{3,6 \cdot \eta_{ny}} \cdot C_{ээ}, \quad (3)$$

где $P_n, P_{об}$ – тепловые потери подающего и обратного трубопроводов, Гкал; U_z – удельная норма расхода газа на выработку тепловой энергии для данного конкретного источника, м³/Гкал; G – расход теплоносителя на источнике, м³/час; h – напор на источнике, м. вод. ст.; η_{ny} – КПД насосной установки (в общем случае зависит от напора, развиваемого насосом $\eta_{i0} = \eta_{i0} (1/h)$); $\dot{O}_a, C_{ээ}$ – цена газа и электроэнергии (грн).

Поскольку реальная система теплоснабжения работает по безэлеваторной схеме, аналогично работе [1] будем рассматривать качественный метод по

температурным графикам 95–70 С, 90–70 С, 90–65 С, 85–65 С, 85–60 С и качественно-количественный по тем же графикам. Ограничения: верхний предел по температуре на выходе из котельной не может быть выше 95 С (из условия невискипания теплоносителя), и не может быть ниже 80 С (исходя из уже запроектированной системы отопления зданий). Минимальный перепад напора у потребителя – не ниже 4 м (достаточный для надёжной работы системы отопления).

Для определения прямых затрат воспользуемся среднестатистическими данными среднесуточных температур наружного воздуха в отопительный период для Харьковской области (табл. 2) [7].

Для анализа прямых затрат на транспортировку теплоносителя учитывались сегодняшние цены на газ 8 865,84 грн/1000 м³ и электроэнергии – 1,8024 грн/кВт. Кроме того, удельные затраты топлива для данного источника – 164,4 кг. у. т/Гкал.

Таблица 2.

Продолжительности стояния температур наружного воздуха в отопительный период для Харьковской области

Температура наружного воздуха	ниже -25 ⁰ С	-25...-20 ⁰ С	-20...-15 ⁰ С	-15...-10 ⁰ С	-10...-5 ⁰ С	-5...0 ⁰ С	0...+10 ⁰ С
Продолжительность, час.	47	125	246	487	829	1299	1551

Температуры в подающем и обратном трубопроводах при качественно-количественном регулировании определяются по известным соотношениям:

$$\tau_1 = t_{вн} + \Delta t_0' \bar{Q}_0^{0,8} + (\delta \tau_0' - 0,5 \Theta') \frac{\bar{Q}_0}{G_0}; \quad (4)$$

$$\tau_2 = t_{вн} + \Delta t_0' \bar{Q}_0^{0,8} - 0,5 \Theta' \frac{\bar{Q}_0}{G_0}; \quad (5)$$

$$\bar{G}_0 = \sqrt[3]{\bar{Q}_0}, \quad (6)$$

где $t_{вн}$ – расчётная температура внутри помещения (20⁰С); $\Delta t_0'$ – расчётный температурный напор в нагревательных приборах; \bar{Q}_0 – относительный расход на отопление при

текущей наружной температуре; $\delta \tau_0'$ – расчётная разность температур сетевой воды на источнике; Θ' – расчётная разность температур у потребителя; \bar{G}_0 – относительный расход сетевой воды.

Для расчёта прямых затрат при регулировании тепловой нагрузки необходимо знать не только расход на источнике, но и напор, соответствующий этому расходу (3). Напоры на источнике определялись методом поконтурной увязки для семи значений температур наружного воздуха (соответственно табл. 2).

Результаты расчёта сведены в таблицу 3. Как видно из расчёта, минимальные затраты на транспортировку достигаются при качественно-

количественном регулировании по температурному графику 85–60°C. На рисунке 2 показаны изменения расхода, а на рисунке 3 - температур теплоносителя в

зависимости от температуры наружного воздуха. Максимальный расход – 128 м³/час, при T_{нв} – 23°C.

Таблица 3

Прямые затраты в зависимости от метода регулирования и температурного графика

Метод регулирования	Суммарные затраты на компенсацию тепловых потерь и затрат электроэнергии на перекачку теплоносителя, грн/сезон						
	95–70°C	90–65°C	85–60°C	95–75°C	90–70°C	85–65°C	80–60°C
Качественный	1 091 062,76	1 001 284,48	989 754,18	1 184 673,09	1 109 514,92	1 099 652,12	1 000 256,16
Качественно-количественный	989 846,66	976 487,12	952 709,25	1 124 629,38	994 348,28	962 836,97	936 671,88

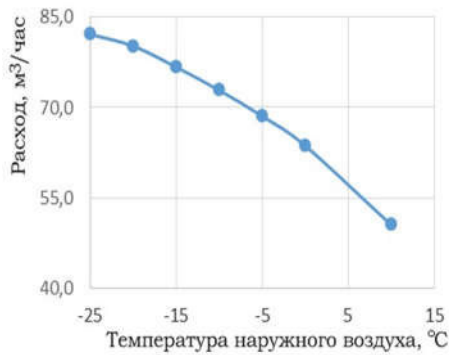


Рис. 2. Изменение расхода в зависимости от T_{нв}

Напор на источнике – 26 м. вод. ст. Минимальный расход – 79 м³/час. Напор на источнике – 12,7 м. вод. ст. Однако при понижении напора могут остановиться системы отопления наиболее удалённых потребителей. Поэтому необходимо выполнить поверочный гидравлический расчёт тепловой сети. Потребители подключены к котельной по трём контурам. Самый нагруженный – второй. Поэтому достаточно выполнить гидравлический расчёт только для этого контура, два других более устойчивые. Составим расчётную схему этого контура (рис. 4) и выполним расчёт.

Изменение расхода в зависимости от температуры наружного воздуха определяется зависимостью (6). Для

определения напора будем решать систему уравнений Кирхгофа для крыла методом поконтурной увязки [5].

Зная длину участков, определяем сопротивление сети s₀...s₅ по известным соотношениям:

$$s = \frac{0,0894}{3600^2 \cdot 9,81} \cdot \frac{k_e^{0,25} \gamma}{d^{5,25}} \quad (7)$$

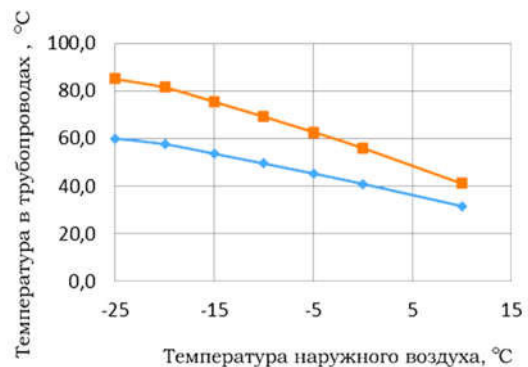


Рис. 3. Изменение температуры в подающем (—■—) и обратном трубопроводах(—●—) в зависимости от T_{нв}

Сопротивления ответвлений на потребителей определяются из условий работы системы при напоре 26 м, когда расходы на всех ответвлениях известны.

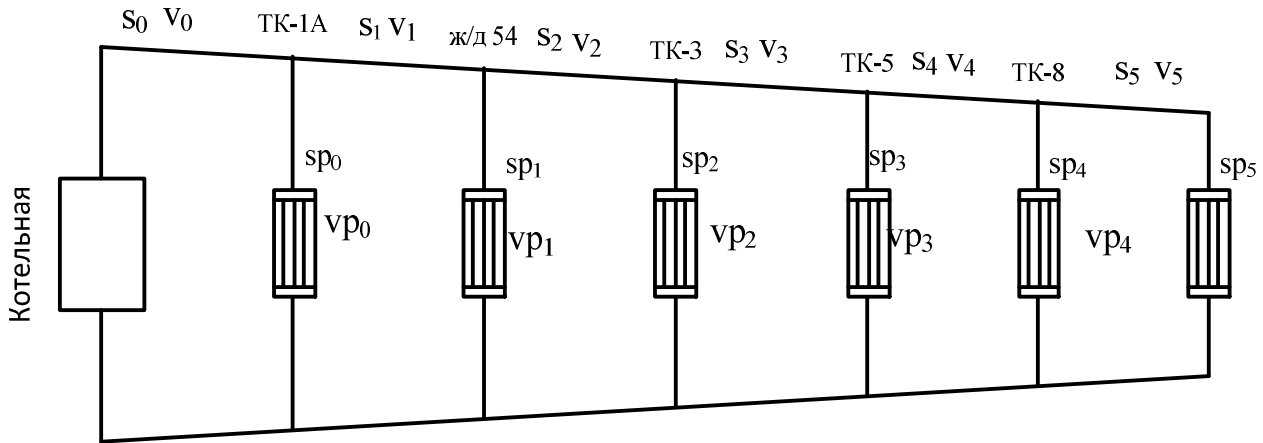


Рис. 4. Расчётная схема контура 2 системы теплоснабжения от котельной

Затем определяем давление на источнике, при котором расход в контуре будет составлять 50,53 м³/час (температура наружного воздуха +10 °С). Расходы в

контурах и на ответвлениях на потребители известны (8). Запишем уравнения Кирхгофа для шести контуров (9):

$$v_s^T = (57.56 \ 49.79 \ 41.09 \ 27.16 \ 15.67 \ 10.93) \quad (8)$$

$$v := \frac{v_s}{3600}$$

$$\left. \begin{aligned} 2 \cdot s_0 \cdot (v_0)^2 + sp_0 \cdot (v_0 - v_1)^2 &= 12.666 \\ 2 \cdot s_0 \cdot (v_0)^2 + 2 \cdot s_1 \cdot (v_1)^2 + sp_1 \cdot (v_1 - v_2)^2 &= 12.658 \\ 2 \cdot s_0 \cdot (v_0)^2 + 2 \cdot s_1 \cdot (v_1)^2 + 2 \cdot s_2 \cdot (v_2)^2 + sp_2 \cdot (v_2 - v_3)^2 &= 12.663 \\ 2 \cdot s_0 \cdot (v_0)^2 + 2 \cdot s_1 \cdot (v_1)^2 + 2 \cdot s_2 \cdot (v_2)^2 + 2 \cdot s_3 \cdot (v_3)^2 + sp_3 \cdot (v_3 - v_4)^2 &= 12.61 \\ 2 \cdot s_0 \cdot (v_0)^2 + 2 \cdot s_1 \cdot (v_1)^2 + 2 \cdot s_2 \cdot (v_2)^2 + 2 \cdot s_3 \cdot (v_3)^2 + 2 \cdot s_4 \cdot (v_4)^2 + sp_4 \cdot (v_4 - v_5)^2 &= 12.64 \\ 2 \cdot s_0 \cdot (v_0)^2 + 2 \cdot s_1 \cdot (v_1)^2 + 2 \cdot s_2 \cdot (v_2)^2 + 2 \cdot s_3 \cdot (v_3)^2 + 2 \cdot s_4 \cdot (v_4)^2 + (2 \cdot s_5 + sp_5) \cdot (v_5)^2 &= 12.625 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Уточнённый расход в контурах и у потребителей:

$$v_s^T := v \cdot 3600 \quad v_s^T = (57.6 \ 49.237 \ 40.608 \ 26.82 \ 15.599 \ 10.8) \quad (10)$$

Система уравнений (9) нами решалась с помощью стандартного пакета прикладных программ Mathcad 15 [9].

Проверка показала, что вся система устойчива и хорошо работает при качественно-количественном регулировании и снижении напора до 12,7 кг/см².

Как показал расчёт, напор изменяется линейно в зависимости от температуры наружного воздуха. На рисунке 5. представлены зависимость изменения напора на источнике в зависимости от температуры наружного воздуха.

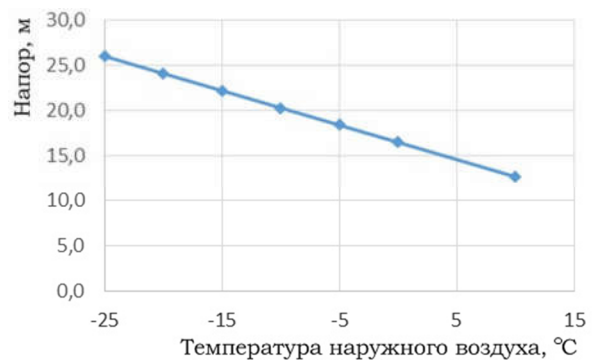


Рис. 5. Изменение напора (м) в зависимости от Тнв.

Выводы. Для реального источника теплоснабжения с тепловой нагрузкой 3,28 МВт проанализировано влияние тепловых потерь в сетях на режим теплоснабжения, определены расходы у потребителей с учётом тепловых потерь в сети и предложен метод регулирования, при котором прямые затраты за отопительный сезон будут минимальные.

Построены графики зависимости напора на источнике от температуры наружного воздуха для оптимального метода регулирования. Как показали исследования, напор изменяется линейно. Выбран температурный график качественно-количественного метода регулирования.

Даны рекомендации по применению поконтурного регулирования тепловых сетей и подключённых к ним потребителей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Збараз Л. И. Моделирование децентрализованного источника теплоснабжения и выбор оптимальных параметров его работы / Л. И. Збараз // Комунальне господарство міст : зб. наук. пр. / Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків, 2015. – Вип. 23. – С. 91–97.
2. Ганжа А. Н. Выбор рациональных параметров отпуска теплоты от источника системы теплоснабжения / А. Н. Ганжа, В. Н. Подкопай // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 8(114). – С. 8–13.
3. Ганжа А. Н. Оптимизация параметров системы теплоснабжения с учетом потерь теплоты при транспортировании теплоносителя / А. Н. Ганжа, В. Н. Подкопай // Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды. II межотраслевая научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения и защиты окружающей природной среды (27 - 28 марта 2013 г., Харьков) : сб. тр. / Гос. предприятие "Укр. науч.-техн. центр металург. пром-сти "Энергосталь". – Харьков, 2013. – С. 89–94.
4. Ганжа А. Н. Выбор рациональных параметров теплоносителя в системе теплоснабжения и способов регулирования тепловой нагрузки с учетом фактических потерь теплоты / А. Н. Ганжа, В. Н. Подкопай // Муниципальна енергетика: проблеми, рішення. П'ята міжнародна науково-технічна конференція, 19 - 20 грудня 2013 р. : матеріали конф. / Нац. ун-т кораблебудування ім. Адмірала Макарова. – Миколаїв, 2013. – С. 111–114.
5. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных и паровых тепловых сетях : МУ 34-70-080-84 / Гл. техн. упр. по эксплуатации энергосистем Минэнерго СССР, Произв. об-ние по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей «Союзтехэнерго», Всесоюз. науч.-исслед. теплотехн. ин-т им. Ф. Э. Дзержинского. – Введ. 01.01.85 г. – Москва : СПО Союзтехэнерго, 1985. – 71 с.
6. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. – 5-е изд., перераб. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 360 с.
7. Стоянов Ф. А. Методы системного анализа в задачах оптимального проектирования централизованных систем теплоснабжения / Стоянов Ф. А., Андреев С. Ю., Шевченко Л. П. – Харьков : Золотые страницы, 2005. – 140 с.
8. Методы и алгоритмы расчёта тепловых сетей / [В. Я. Хасилев, А. П. Меренков, Б. М. Каганович, К. С. Светлов, М. К. Такайшвили] ; под. общ. ред. В. Я. Хасилева, А. П. Меренкова. – Москва : Энергия, 1978. – 176 с.
9. Benker H. Mathematik-Problemlösungen mit MATHCAD und MATHCAD PRIME / Hans Benker. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 303 s.

REFERENCES

1. Zbaraz L.I. *Modelirovanie detsentralizovannogo istochnika teplosnabzheniya i vybor optimal'nykh parametrov ego raboty* [Modelling of the decentralized heat source and the choice of optimal parameters of its work]. *Komunalne gospodarstvo mist* [Urban communal service]. Kharkiv. nats. akad. misk. gosp-va [Kharkiv National Academy of Urban Economy]. Kharkiv, 2015, iss. 23, pp. 91–97. (in Russian)
2. Ganzha A.N. and Podkopaj V.N. *Vybor ratsional'nykh parametrov otpuska teploty ot istochnika sistemy teplosnabzheniya* [The rational parameters choice of heat supply from the heating system source]. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit* [Energy saving. Energetics. Energy audit]. 2013, no. 8(114), pp. 8–13. (in Russian)
3. Ganzha A.N and Podkopaj V.N. *Optimizatsiya parametrov sistemy teplosnabzheniya s uchetom poter' teploty pri transportirovanii teplonositelya* [Optimization of heat supply system parameters, taking into account the heat losses during transportation of the coolant]. *Innovatsionnye puti modernizatsii bazovykh otraslej promyshlennosti, energo- i resursoberezhnie, okhrana okruzhayushhej prirodnoj sredy. II mezhotraslevaya nauchno-prakticheskaya*

konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov v oblasti proektirovaniya predpriyatij gorno-metallurgicheskogo kompleksa, energo- i resursoberezheniya i zashchity okruzhajushchej prirodnoj sredy (27-28 marta 2013 g., Khar'kov) [Modernization innovative ways of basic industries, energy and resource conservation, environmental protection. The II International Scientific-Practical Conference of young scientists and specialists in the field of mining and metallurgical complex, energy- and resource-saving and environment protection (March 27-28, 2013, Khar'kov)]. Gos. predpriyatie "Ukr. nauch.-tekhn. tsentr matallurg. prom-sti "Jenergostal" [State enterprise "Ukrainian scientific-technological centre of minning industry "Energostal"]. Khar'kov, 2013, pp. 89–94. (in Russian)

4. Ganzha A.N. and Pidkopaj V.N. *Vybor ratsional'nykh parametrov teplonosatelya v sisteme teplosnabzheniya i sposobov regulirovaniya teplovoj nagruzki s uchetom fakticheskikh poter' teploty* [The rational parameters choice of the coolant in the heating system and methods for heat load control based on the actual heat loss]. *Munitsypalna energetyka: problemy, rishennia. Piata mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia, 19-20 grudnia 2013 r.* [Municipal energetics: problems, solutions. The fifth International Scientific-Technical Conference, December 19-20, 2013]. Nats. un-t korablebuduvannia im. admirala Makarova [National University of Shipbuilding named after admiral Makarov]. Mykolaiv, 2013, pp. 111–114. (in Russian)
5. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniiu teplovykh poter' v vodyanykh i parovykh teplovykh setyakh: MU 34-70-080-84* [Methodical instructions about the definition of thermal losses in water and steam thermal nets: MU 34-70-080-84]. Gl. tekhn. upr. po ekspluatatsii energosistem Minenergo SSSR, Proizv. ob-nie po naladke, sovershenstvovaniyu tekhnologii i ekspluatatsii elektrostantsii i setej «Soyuztekhenergo», Vsesoyuz. nauch.-issled. teplotekhn. in-t im. F.E. Dzerzhinskogo [The main technical administration on the power supply operation of the USSR Ministry of Energy, the industry equipment for arrangement, technology improvement and power plants operation and "Soyuztekhenergo" nets, All-Union Scientific-Research Institute of Heat Engineering named after F. E. Dzerzhinskiy]. Moskva, 1985, 71 p. (in Russian)
6. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti* [Central heating and heating networks]. Moskva: Energoizdat, 1982, 360 p. (in Russian)
7. Stoyanov F.A., Andreev S.Yu. and Shevchenko L.P. *Metody sistemnogo analiza v zadachakh optimal'nogo proektirovaniya tsentralizovannykh sistem teplosnabzheniya* [The system analysis methods in the tasks of optimum design of the centralized heat supply systems]. Khar'kov: Zoloty stranitsy, 2005, 140 p. (in Russian)
8. Khasilev V.Ya., Merenkov A.P., Kaganovich B.M., Svetlov K.S. and Takajshvili M.K. *Metody i algoritmy rascheta teplovykh setej* [Methods and algorithms of heating networks calculation]. Moskva: Energiya, 1978, 176 p. (in Russian)
9. Benker H. *Mathematik-Problemlösungen mit MATHCAD und MATHCAD PRIME*. Berlin: Springer-Verlag, 2013, 303 p.

Рецензент: д-р т. н., проф. Поліщук С. З.

Надійшла до редколегії: 27.05.2016 р.

Прийнята до друку: 24.06.2016 р.