

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЕГО РАБОТЫ

Проводится анализ совместной работы реального источника децентрализованного теплоснабжения, тепловой сети и потребителей тепловой энергии. Методами математического моделирования определяются оптимальный метод регулирования, температурный график и относительный расход на источнике. Определена целевая функция. Минимизируются прямые затраты на теплоснабжения для конкретной схемы теплоснабжения.

Ключевые слова: Регулирование тепловой нагрузки. Температурный график. Целевая функция. Прямые затраты.

Введение

В настоящее время общепризнанным методом регулирования тепловой нагрузки при децентрализованной схеме теплоснабжения является качественный, с температурным графиком 95-70 °С [1]. Внутридомовая система отопления проектируется из расчета расхода воды на отопление 40 м³/час на 1 Гкал подключённой нагрузки и расчётной температурой теплоносителя на выходе из котельной 95 °С. Вместе с тем, основной модельный ряд выпускаемых сегодня котлов для местных источников теплоснабжения обеспечивает максимальную температуру воды на выходе 85...90 °С и максимальный перепад температур между входом и выходом 15...17 °С [2]. Да и существующие системы отопления при расчетном расходе теплоносителя редко когда работают с перепадом температур на подающем и обратном трубопроводе 25 °С. Это связано с рядом причин: несовпадение проектной и фактической тепловой нагрузки зданий, изменение конструкции системы отопления в ходе эксплуатации, изменение проходного сечения трубопроводов в процессе эксплуатации в связи отложением накипи на стенках, отложение накипи внутри отопительных приборов и так далее.

Цель и постановка задачи исследования

Децентрализованная система отопления работает следующим образом. На нужды отопления подается теплоноситель с заданными параметрами температуры в подающем трубопроводе t_1 и расчетным расходом $G_{от}$. Температура теплоносителя на выходе из системы отопления потребителя t_2 , как правило, отличается от расчетной, нормируемой температурным графиком. В ходе наладочных работ, варьируя расход теплоносителя через отдельные участки системы

отопления, добиваются максимального приближения температуры обратной сетевой воды к температурному графику, при этом обеспечивая комфортную температуру во всех отапливаемых помещениях. При этом реальный расход теплоносителя часто отличается от расчётного (договорного).

Вместе с тем, отопительная нагрузка здания может покрываться как за счет перепада температур на входе и выходе из системы отопления ($t_1 - t_2$), так и изменением расхода G_i теплоносителя через систему отопления

$$Q_{от} = c \cdot G \cdot (t_1 - t_2). \quad (1)$$

С уменьшением расхода теплоносителя уменьшаются затраты электроэнергии на перекачку. Однако температуру воды в подающей магистрали t_1 необходимо поддерживать более высокой. Это приводит к увеличению тепловых потерь на участке тепловой сети между источником и потребителем. При увеличении расхода можно снизить температуру теплоносителя на выходе из источника отопления. При этом тепловые потери снизятся, а затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя возрастут. Целесообразно подобрать такой график, чтобы суммарные затраты Z (прямые затраты на транспортировку [3]) были минимальными. Затраты топлива на компенсацию тепловых потерь между источником и потребителями Z_m , грн

$$Z = Z_m + Z_y \rightarrow \min \quad (2)$$

$$Z_m = (P_n + P_{об}) \cdot V_e \cdot C_e. \quad (3)$$

Затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя Z_y , грн

$$Z_3 = \frac{G \cdot h}{3,6 \cdot \eta_{ny}} \cdot C_{зз} \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) приняты следующие обозначения: $P_n, P_{об}$ - 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 $\eta_{ny} = \eta_{ny} \cdot (1/h)$); $C_{зз}$, $C_{зз}$ - цена газа и электроэнергии (грн.)

Поскольку тарифы на топливо и электроэнергию меняются, меняется и величина прямых затрат. Следовательно, мы получаем оптимизационную задачу выбора параметров качественно-количественного регулирования. Очевидно, оптимальные параметры температуры подачи теплоносителя и расхода для различных схем подключения источник-потребитель будет различная.

В настоящее время для увеличения устойчивости системы отопления здания, чтобы сохранить постоянным расход теплоносителя через систему отопления, на узлах управления устанавливаются балансировочные вентили. Однако для большинства существующих зданий балансировочные вентили отсутствуют, и расход теплоносителя через отопительную систему здания меняется при изменении перепада давления на источнике.

Сформулируем математически изложенную выше задачу оптимального управления децентрализованной системой отопления.

Температуры в подающем и обратном трубопроводах при качественно-количественном регулировании определяются по известным [1, 4] соотношениям, (5)...(7)

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

$$\tau_2 = t_{вн} + \Delta t_0' \bar{Q}_0^{0,8} - 0,5 \Theta' \frac{\bar{Q}_0}{\bar{G}_0} \quad (6)$$

$$\bar{G}_0 = \sqrt[3]{\bar{Q}_0} \quad (7)$$

В формулах (5)...(7) приняты обозначения согласно [3]:

$t_{вн}$ - расчётная температура внутри помещения (20 °С); $\Delta t_0'$ - расчётный температурный напор в нагревательных приборах; \bar{Q} - 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.

Тепловые потери на участках тепловой сети в общем случае определяются по формулам, приведенным в методике [4]

$$P = \sum \beta \cdot q_{yч}(t_m) \cdot \ell \quad (8)$$

В уравнении (8) приняты следующие обозначения: β - коэффициент местных тепловых потерь, зависящий от способа прокладки; ℓ - длина участка теплотрассы; $q_{yч}(t_m)$ - удельные тепловые потери участка теплотрассы (определяется по методике, изложенной в [4]).

Качественно-количественный метод регулирования на практике встречается редко. Это связано со сложностью регулирования расходом в тепловой сети. Регуляторы частоты вращения на сетевых насосах появились относительно недавно, а без этого оборудования нельзя добиться плавного изменения расхода в сетях [5-7].

Как вариант, рассмотрим децентрализованную систему отопления четырех потребителей от местной котельной (рис. 1). Это реально существующая схема отопления потребителей в г. Южном, Харьковского района Харьковской области, от котельной КП Тепловых сетей по ул. Гагарина, 82.

Расчётная схема подключения потребителей к тепловым сетям и протяженность теплотрасс приведена на рис. 1. Тепловые нагрузки сведены в таблицу 2. Участок теплотрассы между ТК2 и ТК3 выполнен надземным, все остальные – подземные.

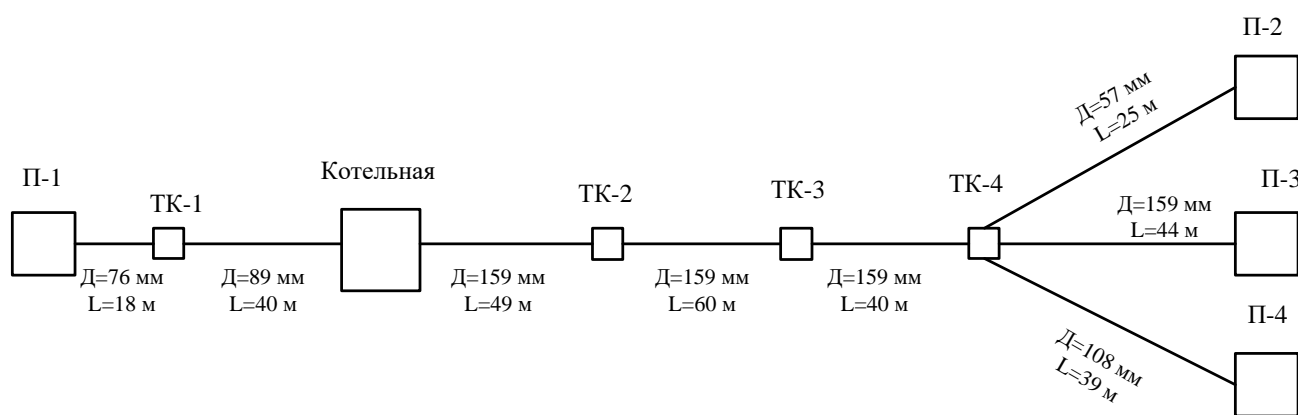


Рис. 1. Схема системы теплоснабжения.

Поскольку на источнике и у трех потребителей установлены тепловычислители, расходы теплоносителя на всех участках нам известны. Расход теплоносителя через клуб (потребитель № 2 в таблице 1) определим с помощью уравнений материального баланса системы теплоснабжения. Тепловые потери, в зависимости от температуры наружного воздуха и теплоносителя, будем определять согласно методике [4]. На выходе из котельной и на всех тепловых вводах установлены манометры. Система отопления плотная, утечку не учитываем. Циркуляция теплоносителя создаётся сетевым насосом; пьезометрические высоты источника и потребителей, а так же гравитационный напор в расчёт так же принимать не будем. Расчётная гидравлическая схема представлена на рисунке 2. Вышеперечисленных исходных данных и допущений достаточно, для окончательной формализации задачи.

Таблица 1.Перечень потребителей

№ п/п	Наименование потребителя	Обозначение на схеме, рис.1	Договорная нагрузка, Гкал/час
1	Деткомбинат	П ₁	0,12
2	Клуб	П ₂	0,2
3	Лицей	П ₃	0,44
4	Поссовет	П ₄	0,08
	Всего		0,84

Как известно, перепад давлений на участке теплосети пропорционален квадрату скорости теплоносителя на этом участке [8]. Коэффициент пропорциональности S_i называется удельным гидравлическим сопротивлением трубопровода и зависит от диаметра трубопровода, его шероховатости и режима движения жидкости. В общем случае все кольцевые сети рассчитываются на основании I и II уравнений Кирхгофа, связывающих напоры и скорости движения жидкости в каждом замкнутом контуре трубопровода. Введём обозначения (таблица 2)

Таблица 2

Обозначения расходов и напоров согласно рис. 2.

№ п/п	Наименование потребителя	Обозначение участка на схеме	Расход	Сопротивление участка, м ³ /час	Напор
1	Котельная	1-2	V_0	S_0	H_0
2	Теплотрасса	1-5, 6-2	V_1	S_1	H_1
3	Деткомбинат	1-3-4-2	V_2	S_2	H_2
4	Клуб	5-7-8-6	V_3	S_3	H_3
5	Лицей	5-9-10-6	V_4	S_4	H_4
6	Поссовет	5-11-12-6	V_5	S_5	H_5

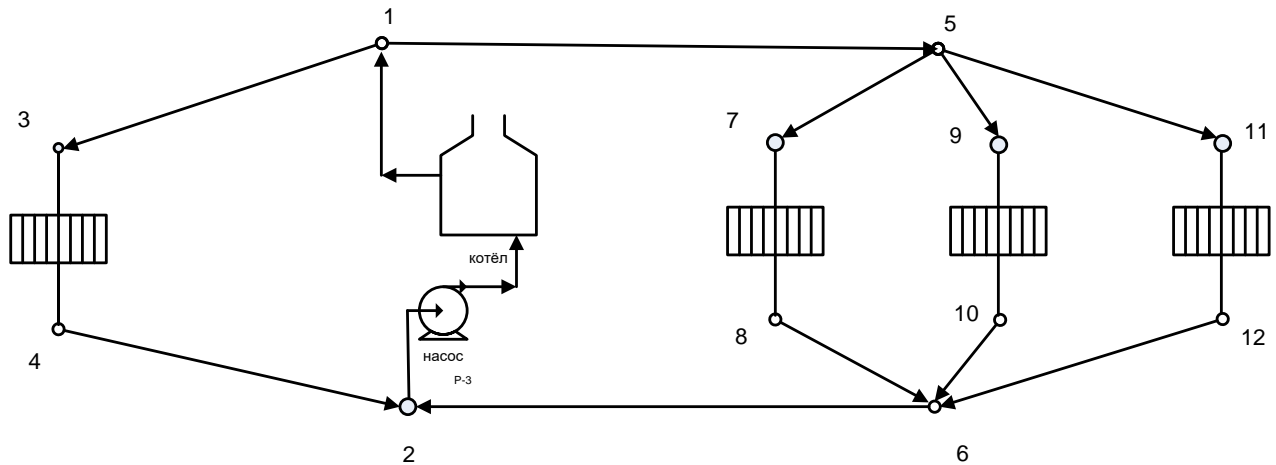


Рис. 2. Расчётная схема подключения абонентов.

Запишем уравнения Кирхгофа для приведенной выше схемы (рис. 2) с учётом принятых обозначений (табл. 2).

$$\begin{cases} s_0 \cdot (v_0)^2 + s_1 \cdot (v_1)^2 = H_0 \\ s_0 \cdot (v_0)^2 + 2 \cdot (s_2) \cdot (v_2)^2 + s_3 (v_3)^2 = H_0 \\ s_3 \cdot (v_3)^2 - s_4 \cdot (v_4)^2 = 0 \\ s_3 \cdot (v_3)^2 - s_5 \cdot (v_5)^2 = 0 \\ v_2 - v_3 - v_4 - v_5 = 0 \\ v_0 - v_1 - v_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Традиционно сопротивления участков сети определяются расчётным путём. Зная длину участка, диаметр, количество и вид местных сопротивлений по известным формулам [1, 3, 8] определяют S_i .

Однако, для трубопроводов, находящихся длительное время в эксплуатации, такой подход влечёт за собой большую погрешность. Это связано с тем, что коэффициенты шероховатости меняются в широком диапазоне значений. Поэтому, для данной конкретной задачи, сопротивления участков сети S_i целесообразно определять не расчётным, а экспериментальным методом. Для исходной схемы (9) мы имеем 4 уравнения с шестью неизвестными. Для решения задачи достаточно было проведения натурального эксперимента, а именно: отключение на полчаса одного потребителя (удобнее всего было отключить клуб, $V_3=0$) и снять показания с приборов учёта и манометров. Результаты замеров при эксплуатационном и экспериментальном режимах сведены в таблицу 3.

Таблица 3.

Фактические расходы воды на источнике и у потребителей

№ п/п	Наименование потребителя	Обозначение	Расход теплоносителя, v_i , м ³ /час	Расход теплоносителя, t_i , м ³ /час
1	Деткомбинат	V_2	4,4	4,9
2	Клуб	V_3	7,6	0,0
3	Лицей	V_4	19,3	22,7
4	Поссовет	V_5	2,9	3,2
5	Суммарный на источнике	V_0	34,2	30,8
6	Перепад на источнике, h, м.вод.ст.		14	16

Обозначим вектор расходов при теплоснабжении всех потребителей V , расходы на ветвях соответственно v_i , а вектор расходов при проведении эксперимента, когда отключён клуб, символом T , соответственно расходы на ветвях t_i . Достигнутый сегодня уровень развития вычислительной техники и прикладных программных продуктов позволяет легко решать такие задачи различными математическими

методами. Поэтому на выборе методов решения останавливаться не будем.

Зная расходы и напоры для двух режимов, с помощью пакета Mathcad [10], решаем систему (9) относительно неизвестных сопротивлений участков сети s_i .

$$v := \begin{pmatrix} 34.2 \\ 4.4 \\ 29.8 \\ 7.6 \\ 19.3 \\ 2.9 \end{pmatrix} \quad t := \begin{pmatrix} 30.8 \\ 4.9 \\ 25.9 \\ 0 \\ 22.7 \\ 3.2 \end{pmatrix}$$

$$M := \begin{bmatrix} (v_0)^2 & (v_1)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (v_0)^2 & 0 & 2 \cdot (v_2)^2 & (v_3)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (v_3)^2 & -(v_4)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (v_3)^2 & 0 & -(v_5)^2 \\ (t_0)^2 & (t_1)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (t_0)^2 & 0 & 2 \cdot (t_2)^2 & 0 & (t_4)^2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$h := \begin{pmatrix} 14 \\ 14 \\ 0 \\ 0 \\ 16 \\ 16 \end{pmatrix}$$

$$s := \text{lsolve}(M, h)$$

$$s^T = (2.715 \times 10^{-3} \quad 0.559 \quad 1.39 \times 10^{-3} \quad 0.145 \quad 0.022 \quad 0.994)$$

Теперь, зная фактические сопротивления всех участков, мы можем определить, как изменяется расход у каждого потребителя и на всех участках при изменении напора на источнике. Задача усложняется тем, что необходимо решать нелинейную систему уравнений [1].

Поскольку количество уравнений в системе невелико (6 уравнений), для его решения опять воспользуемся пакетом Mathcad, без привлечения

методов поконтурной или поузловой увязки [5]. Меняя в условии величину напора на источнике h , получаем распределение расходов для всех ветвей v_i . Ниже, для примера, приведен расчёт расходов во всех ветвях при напоре на источнике $h=12$ м.

$$s := s \quad h := 12$$

Given

$$s_0 \cdot (v_0)^2 + s_1 \cdot (v_1)^2 = h$$

$$s_0 \cdot (v_0)^2 + 2 \cdot (s_2) \cdot (v_2)^2 + s_3 (v_3)^2 = h$$

$$s_3 \cdot (v_3)^2 - s_4 \cdot (v_4)^2 = 0$$

$$s_3 \cdot (v_3)^2 - s_5 \cdot (v_5)^2 = 0$$

$$v_2 - v_3 - v_4 - v_5 = 0$$

$$v_0 - v_1 - v_2 = 0$$

$$v := \text{Find}(v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$$

$$v^T = (31.663 \quad 4.074 \quad 27.589 \quad 7.036 \quad 17.868 \quad 2.685)$$

Оптимизационную задачу выбора температурного графика и напора на источнике будем решать методом полного перебора для расчётных температур теплоносителя в подающем трубопроводе 80, 85, 90, 95 °С, перепадов температур ($\tau_1 - \tau_2$) 20 и 25 °С, и двух способов регулирования: качественного и качественно-количественного [10]. Для расчёта так же взяты утверждённые удельные затраты топлива для существующего источника теплоснабжения – 174 кг.у.т/Гкал. В таблице 4 приведены среднестатистические данные для Харьковской области продолжительности стояния температур наружного воздуха в отопительный период [5].

Таблица 4.

Продолжительности стояния температур наружного воздуха в отопительный период для Харьковской области

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

В расчёте прямых затрат приняты: стоимость электроэнергии – 1,8024 грн/кВт, стоимость газа – 8 865,84 грн/1000м³. При проведении расчётов выработка тепловой энергии на источнике определяется как сумма полезной нагрузки на отопление потребителей, тепловых потерь в

тепловых сетях и затрат на обеспечение собственных нужд котельной. Результаты расчёта сведены в таблицу 5. Учитываются стоимость затрат на перекачку теплоносителя и компенсацию тепловых потерь в тепловых сетях.

Таблица 5.

Прямые затраты в зависимости от метода регулирования и температурного графика

Суммарные затраты на компенсацию тепловых потерь и затрат электроэнергии на перекачку теплоносителя, грн/сезон.							
Метод регулирования	95-70 °С	90-65 °С	85-60 °С	95-75 °С	90-70 °С	85-65 °С	80-60 °С
Качественно-количественный	189732,55	183943,86	178155,18	196396,05	190598,97	184801,88	179004,80
Качественный	195545,52	192358,70	189171,88	204713,94	201511,66	198309,37	195107,09

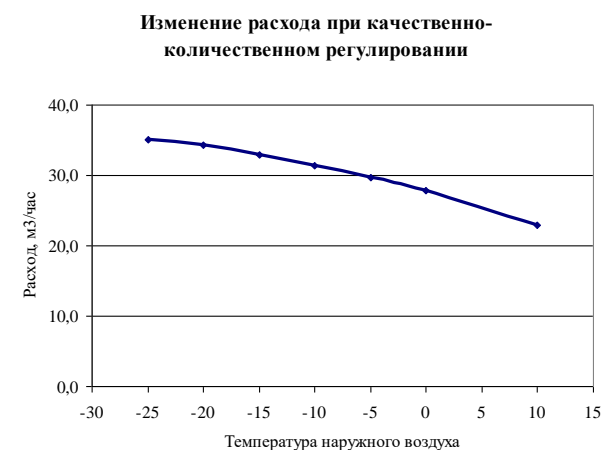
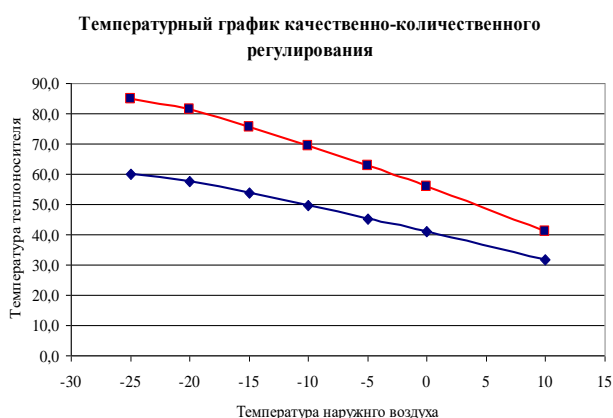


Рис. 3 График зависимости оптимальных параметров работы котельной от температуры наружного воздуха

Выводы

При одинаковых исходных данных, температурный график на источнике 95-70 °С, при качественно-количественном регулировании прямые затраты на 5 812,96 грн. ниже, чем при качественном регулировании. При снижении графика до 85-60 °С (температурный напор оставляем 25 °С), тепловые потери при качественно-количественном регулировании снижаются быстрее, чем при качественном, и разница между прямыми затратами

увеличивается до 11 016,70 грн.

Таким образом, если перейти с графика качественного регулирования 95-70 °С на качественно-количественный и температурным графиком 85-60 °С, годовая экономия при существующих тарифах на газ и электроэнергию составит 17 390,33 грн. Это соизмеримо с двухмесячным фондом заработной платы оперативного персонала котельной.

На практике реализовать качественно-количественный метод регулирования без привлечения САР достаточно сложно. Для оператора тяжело в ручном режиме регулировать температуру теплоносителя и перепад давления на выходе из котельной в зависимости от температуры наружного воздуха. Для этого как отечественные, так и зарубежные производители выпускают различные типы блоков управления котельной, контроллеров, позволяющие автоматически поддерживать заданный температурный и гидравлический режим работы котельной. На наш взгляд здесь можно рекомендовать БАУ-ТП «АЛЬФА-М», выпускаемый Запорожским ООО «НПП «Промэлектроника». Этот производитель хорошо зарекомендовал себя на отечественном рынке, блок надёжно работает вместе с отечественными и импортными котлами, насосами, узлами подпитки. Затраты на установку комплект такого оборудования с датчиками, частотными регулятором [11], исполнительными механизмами обойдётся теплоснабжающей организации в 15...17 тыс грн., а срок окупаемости от внедрения не будет превосходить одного года.

Литература

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети /Е.Я Соколов. – М.: Энергоиздат, 1982. - 360 с.
2. Burkhardt, W.; Kraus, R.: Projektierung von Warmwasserheizungen. Oldenbourg Industrieverlag. München. 2001.
3. Козин В.Е. Учебное пособие для студентов вузов./В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.М. Марков и др. - М.: Высш. школа, 1980. - 408 с.

4. МУ 34-70-080-84. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных и паровых тепловых сетях. М.: 1985. СПО Союзтехэнерго. 71 с.
5. Стоянов Ф.А., Андреев С.Ю., Шевченко Л.П. Методы системного анализа в задачах оптимального проектирования централизованных систем теплоснабжения: Учебное пособие для ВУЗов.- Харьков: Золотые страницы, 2005.- 140 с.
6. Sobirey, Marco: Evaluierung und Weiterentwicklung eines Programms zur Optimierung der Hydraulik, Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel. 2003.
7. Otto, J.: Pumpenheizung richtig geplant. Krammer Verlag. Düsseldorf. 1982.
8. Методы и алгоритмы расчёта тепловых сетей /Хасилев В.Я., Меренков А.П., Казанович Б.М., и др.; под. общ. ред. Хасилева В.Я., Меренкова А.П. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.
9. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
10. Mathematik-Problemlösungen mit MATHCAD und MATHCAD PRIME von Hans Benker. Spinger-Verlag Berlin Heidelberg 2013- 303 s.
11. F.W. Oventrop: Fachbuch Hydraulischer Abgleich. Olsberg. 2003

References

1. Sokolov E.Ya. Central heating and thermal networks. M: Energoizdat, 1982. - 360 p.
2. Burkhardt, W.; Kraus, R.: Design of water heating. Oldenbourg industrial publishing house. Munich. 2001.
3. Kozin V.E., Levin T.A, Markov A.M. The manual for students vuzov. - M: Vyssh. school, 1980. - 408 p.

4. SPO Soyuztekhnenergo. MU 34-70-080-84. Methodical instructions by definition of thermal losses in water and steam thermal networks. M: 1985. 71 p.
5. Stoyanov F.A., Andreev S. Yu., Shevchenko L.P. Methods of the system analysis in problems of optimum design of the centralized systems of a heat supply: The manual for HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS. - Kharkov: Gold pages, 2005, - 140 p.
6. Sobirey, Marko: Certification and program improvement for optimization of hydraulics, the thesis in the special higher educational institution Braunschweig. Wolfenbuttel. In 2003.
7. Otto, Joule.: Right choice of heating pumps. Krammer publishing house. Dusseldorf. In 1982.
8. Hasilev V. Ya., Merenkov A.P., Kaganovich B. M..... Methods and algorithms of calculation thermal Networks. - M: Energy, 1978. - 176 p.
9. Himmelblau D. Applied nonlinear programming. - M: World, 1975. - 536 p.
10. Hans Benker. Examples of the solution of mathematical tasks by means of a MATHCAD package. 2013-303 p.
11. F.V.Oventrop: The textbook in hydraulics. Olsberg. 2003

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.А. Редько, Харьковський національний університет будівництва та архітектури.

Автор: ЗБАРАЗ Леонід Йосифович
Кандидат технічних наук
КП Теплових мереж. Начальник відділу
E-mail - Zbaraz_Len@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО РОБОТИ

Л. Й. Збараз

Проводиться аналіз спільної роботи реального джерела децентралізованого теплопостачання, теплової мережі й споживачів теплової енергії. Методами математичного моделювання визначаються оптимальний метод регулювання, температурний графік і прямі витрати на джерелі. Визначено цільову функцію. Мінімізуються прямі витрати на теплопостачання для конкретної схеми теплопостачання.

Ключові слов: Регулювання теплового навантаження. Температурний графік. Цільова функція. Прямі витрати.

MODELLING OF THE DECENTRALIZED SOURCE OF THE HEAT SUPPLY AND CHOICE OF OPTIMUM PARAMETERS OF ITS WORK

L. Zbaraz

The analysis of collaboration of a real source of the decentralized heat supply, thermal network and four consumers of thermal energy is carried out. On the basis of Kirkhgof's laws the system of the equations describing mathematical model of a hydraulic chain a source - a thermal network - consumers is made. Criterion function of a factor cost on compensation of thermal losses in a thermal network depending on temperature schedule of the heat-carrier and compensation of expenses for heat-carrier transfer is defined. Natural experiment on the basis of which real factors of hydraulic resistance of each site of a hydraulic chain of model are defined is made. By means of a package of the applied MachCAD programs the optimum method of regulation, the temperature schedule and a relative expense on a source at which criterion function of a factor cost reaches a minimum will be defined by methods of mathematical modeling. The economy from introduction of the offered model of a heat supply is defined. Concrete recommendations about transfer of work of a source on an optimum method of regulation of thermal loading are made.

Keywords. Regulation of thermal loading. Temperature schedule. Criterion function. Factor cost.