

тра — швидкості теплоносія в ґрунтовому теплообміннику. Запропоновано розрахункові співвідношення методу вибору довжини теплообмінника в залежності від площі геліоколекторів різного типу за умови обмеження швидкості теплоносія.

Ключові слова: ґрунтовий теплообмінник, сезонний акумулятор, геліосистема.

В.В. Высочин, В.И. Мощный. Влияние размеров грунтового теплообменника на сопряженные режимы работы с гелиосистемой. Проведены численные исследования нестационарного теплообмена в сезонном аккумуляторе тепла гелиосистемы с грунтовым теплообменником в процессе периодической, с суточным циклом, зарядки в летний период. Теплообменник представлен в виде вертикального зонда с коаксиальным расположением труб. Математическая модель сопряженной работы гелиосистемы и грунтового аккумулятора включает дифференциальные уравнения, описывающие условия прихода и преобразования солнечной энергии в гелиоколлекторе, а также — теплообмен в грунтовом теплообменнике и в массиве грунта. Показана необходимость учета взаимного влияния размеров гелиоколлекторов и грунтового теплообменника. Это влияние в заданных условиях может быть выражено в виде функциональной зависимости от расходного параметра — скорости теплоносителя в грунтовом теплообменнике. Предложены расчетные соотношения метода выбора длины теплообменника в зависимости от площади гелиоколлекторов разного типа при условии ограничения скорости теплоносителя.

Ключевые слова: грунтовый теплообменник, сезонный аккумулятор, гелиосистема.

V.V. Wysochin, V.I. Motsny. Effect of the ground heat exchanger dimensions on the heliosystem operation with coupled modes. The numerical investigations of unsteady heat transfer in the seasonal heat accumulator of a solar plant system with a ground heat exchanger in the process of a periodic, with a diurnal cycle, charging in the summer period, are carried out. The heat exchanger is a vertical sonde with a coaxial tube arrangement. The mathematical model of conjugated operation of the heliosystem and the ground heat exchanger includes differential equations describing the conditions of entry and conversion of the solar energy in the sunlight collector, as well as the heat exchange in both the ground heat exchanger and in the array of ground. The necessity of considering the mutual influence of dimensions of the sunlight collectors and of the ground heat exchanger is shown. Under given conditions this effect may be expressed as the functional dependence upon the cost characteristic, that is, the speed of the heat carrier in the ground heat exchanger. The method of choosing the heat exchanger length depending on the area of different heliocollectors, subject to the limitation of the heat-carrying velocity, is introduced.

Keywords: ground heat exchanger, seasonal heat accumulator, solar plant/heliosystem.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-та Денисова А.Є.

Поступила в редакцию 24 февраля 2014 г.

УДК 681.5:658.264.003.13

С.В. Бабич, инженер,
В.О. Давыдов, канд. техн. наук, доц.,
Одес. нац. политехн. ун-т

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКИХ РАЙОНОВ

Введение. Отопительная система современного украинского города представляет собой хаотичное распределение различных тепловых источников. Основой по-прежнему остается централизованное теплоснабжение, но в последнее время все больший процент потребителей осуществляет теплоснабжение крышными котельными. Наряду с этим также используются индивидуальные системы отопления на базе АГВ и тепловых насосов, а в самое холодное время

DOI: 10.15276/opu.1.43.2014.24

© С.В. Бабич, В.О. Давыдов, 2014

года конечные потребители вынуждены дополнительно подключать источники тепла прямого преобразования электрической энергии в тепловую. Кроме того, в отдельных случаях отопление может осуществляться водогрейными и паровыми котлами, работающими на различных альтернативных видах топлива, например, отходах производства в виде древесных опилок и т.п.

Такое многообразие тепловых источников различных как по своей физической природе, так и по эффективности преобразования первичных ресурсов в тепловую энергию приводит к тому, что себестоимость единицы получаемой потребителем тепловой энергии в каждом отдельном случае различна. Использование сетки тарифов на газ и электроэнергию еще больше варьируют стоимость единицы тепловой энергии и делают ее зависящей от количества уже использованных ресурсов и времени суток. Если диапазоны изменения стоимости тепловой энергии, получаемой из различных тепловых источников, перекрываются, то это потенциально позволяет сформулировать и поставить задачу оптимизации процесса отопления в тепловых сетях современного города.

Анализ последних исследований и публикаций. В последние десятилетия работы по совершенствованию тепловых сетей городских районов ведутся во множестве стран. Особый интерес представляют концепции перехода на индивидуальное отопление и использование альтернативных возобновляемых источников энергии [1, 2]. Предлагаемые концепции позволяют повысить эффективность тепловых сетей за счет замены существующих источников тепла экономически более эффективными.

Следующий шаг в развитии данных концепций заключается в замене одного источника тепла двумя и более альтернативными с последующим решением задачи управления структурой такого оборудования для повышения надежности обеспечения теплом в системе отопления.

Цель работы. С точки зрения конечного потребителя оптимальное решение заключается в выборе в каждый момент времени источника тепла, генерирующего тепловую энергию с минимальной на данный момент себестоимостью. Целью работы является проведение оценки себестоимости тепловой энергии, получаемой от различных источников, что позволит определить условия, при которых различные тепловые источники могут конкурировать друг с другом. В дальнейшем результаты такого анализа могут быть использованы при синтезе стратегии управления структурой систем отопления.

Изложение основного материала. Проведем анализ основных тепловых источников, используемых в городе с целью определения зависимости цены получаемой тепловой энергии от различных факторов. Цены на газ и электроэнергию взяты по состоянию на 01.02.2014.

Можно выделить следующие основные преимущества *централизованного отопления*:

- вывод потенциально взрывоопасного технологического оборудования из жилых помещений;
- точечная концентрация вредных выбросов на источниках, где их можно эффективно утилизировать;
- возможность работы на разных видах альтернативного топлива (включая местное), вторичных и возобновляемых энергоресурсах;
- возможность замещать простое сжигание топлива (при температуре 1200...1800 °С для подогрева воздуха до 20 °С) тепловыми отходами производственных циклов, в первую очередь теплового цикла производства электроэнергии на ТЭЦ;
- относительно гораздо более высокий электрический КПД крупных ТЭЦ и тепловой КПД крупных котельных, работающих на твердом топливе.

Недостатками централизованного отопления являются:

- требует прокладки разветвленной сети подземных или наземных специальных трубопроводов;
- требует обеспечение надежной теплоизоляции теплопроводов, их защиту от коррозии и механических повреждений при длительной эксплуатации;
- характеризуется высокими тепловыми потерями в протяженном трубопроводе, определяемыми как собственно тепловыми потерями через изоляцию, так и утечками теплоносителя, что требует постоянной подпитки системы сетевой водой;

— невозможность потребителей самостоятельно регулировать объемы потребления, а также включать и отключать отопления.

Технологически система централизованного отопления состоит из котлов, магистрального трубопровода, тепловых пунктов и конечного потребителя. Высокая эффективность котлов обеспечивает низкую себестоимость тепловой энергии, которая частично компенсируется тепловыми потерями в трубопроводе и утечками теплоносителя.

Для примера рассмотрим магистральный теплоизолированный трубопровод с диаметром условного прохода 300 мм, расположенный на открытом воздухе. Температура теплоносителя принята равной 100 °С. Согласно СНиП 41-03-2003 нормативные тепловые потери такого трубопровода составляют 76 Вт/м (80,7 Вт/м²). При подземной канальной и бесканальной прокладках этого же трубопровода эти величины соответственно составляют 105 Вт/м (111 Вт/м²) и 157 Вт/м (166,6 Вт/м²).

Пусть жилой массив состоит из типовых 9-этажных зданий на 144 квартиры со средним уровнем тепловых потерь 350 кВт. В таком жилом массиве для подключения одного дома требуется в среднем 100 м трубопровода. Стоимость единицы тепловой энергии, получаемой на котельной, в первую очередь определяется стоимостью сжигаемого газа. Затраты на электроэнергию, необходимую для приводов насосов, сознательно не рассматриваются, т.к. они только увеличивают себестоимость тепловой энергии. Примем, что тепловые потери в трубопроводе соответствуют нормативным. Тогда зависимость себестоимости тепла S от количества подключенных домов N в системе централизованного отопления принимает вид, показанный на рис. 1, а. Эффективность такой системы теплоснабжения при обеспечении теплом городского района, состоящего из 200 домов с суммарной тепловой нагрузкой 70 МВт, составляет 92,6 %.

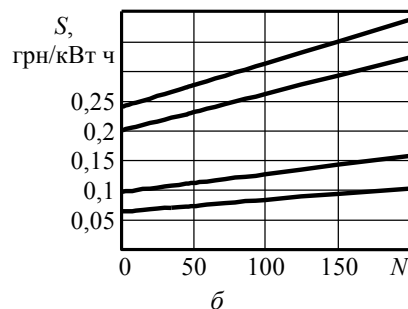
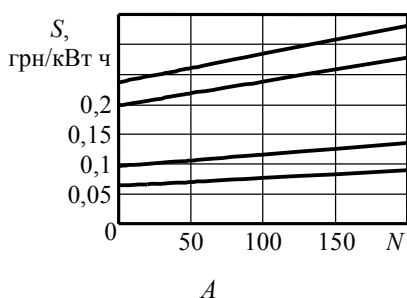


Рис. 1. Зависимость себестоимости S от N : при уровне тепловых потерь, соответствующих нормам (а); при среднем износе трубопровода (б)

На практике при отсутствии мероприятий по ремонту и обслуживанию согласно нормативным требованиям тепловые потери трубопроводов существенно зависят от качества и состояния тепловой изоляции. Проведен сравнительный анализ тепловых потерь, который показывает, что полное намокание изоляции на основе минеральной ваты приводит к увеличению тепловых потерь в 11 раз [3]. Многочисленные проверки состояния тепловых сетей в различных городах свидетельствуют о том, что фактические тепловые потери в десятки и сотни раз превышают нормативные.

Другой вид потерь тепловой энергии связан с утечками теплоносителя. Нормированное значение потерь теплоносителя не должно превышать 0,0025 кг/(ч·м) [4]. Фактическое состояние трубопровода таково, что данные потери существенно выше и по практическим данным могут достигать 0,01 кг/(ч·м).

Рассмотрим вариант средних потерь. Пусть тепловые потери в 5 раз превышают нормативные, а потери теплоносителя составляют 0,005 кг/(ч·м). Соответствующий график зависимости себестоимости тепла S от количества подключенных домов N приведен на рис. 1, б. Эффективность такой системы теплоснабжения при обеспечении теплом рассмотренного городского района с суммарной тепловой нагрузкой 70 МВт составляет 63 %.

По результатам обследований различных тепловых сетей [5] делается вывод, что до 50% тепла может просто не доходить до конечного потребителя из-за повреждения либо отсутствия изоляции и утечек теплоносителя.

К системам *децентрализованного газового отопления* относятся домовые котельные и индивидуальные котлы, устанавливаемые в каждой квартире.

Достоинствами таких систем являются:

- незначительные тепловые потери в теплопроводе, т.к. в значительной степени монтируется внутри зданий и квартир;
- существенно более низкие требования к теплоизоляции теплопроводов и их защите от коррозии и механических повреждений;
- возможность потребителей самостоятельно регулировать объемы потребления, включения и отключения отопления.

Среди недостатков можно выделить:

- в индивидуальных системах отопления допустимо применение котлов только с закрытой камерой сгорания и выделенным воздуховодом для забора воздуха с улицы;
- необходимость организации эффективного дымоудаления;
- необходимость проведения мероприятий по предотвращению образования конденсата в газоходах.

Эффективность таких систем отопления в первую очередь определяется эффективностью самого котла. КПД современных котлов для индивидуального отопления достигает 85...90 %. Без учета затрат на электроэнергию с учетом диапазона изменения тарифов на газ себестоимость тепла, генерируемого котлом с КПД 85 %, составляет 0,067...0,25 грн/(кВт·ч).

Достоинства *индивидуального отопления тепловым насосом*:

- коэффициент трансформации тепла больше единицы, что обеспечивает высокую эффективность;
- отсутствие вредных выбросов в окружающую среду;
- взрыво- и пожаробезопасность;
- обеспечение как отопления, так и охлаждения.

Недостатки индивидуального отопления тепловым насосом:

- более высокая цена первоначальной установки по сравнению с газовыми котлами;
- более высокий уровень шума по сравнению с газовым котлом;
- ограниченный температурный диапазон использования.

Такие системы представляют особый интерес, т.к. тепловой коэффициент преобразования в них выше единицы. Точное значение коэффициента преобразования вычисляется по термодинамическому циклу работы конкретной установки, но ориентировочное значение можно определить по идеальному циклу Карно следующим образом:

$$\eta = K_{\text{комп}} \frac{T_{\text{вых}}}{T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}},$$

где $K_{\text{комп}}$ — коэффициент, определяющий степень термодинамического совершенства установки (для ТНУ мощностью 0,5...3 кВт $K_{\text{комп}} = 0,2...0,35$);

$T_{\text{вых}}$ — температура воздуха на выходе теплонасосной установки (ТНУ), К;

$T_{\text{вх}}$ — температура воздуха на входе ТНУ, К.

На рис. 2 представлены зависимости тепловых коэффициентов преобразования от температуры окружающей среды для режимов “отопление” и “охлаждение”.

Себестоимость тепловой энергии, получаемой при помощи ТНУ, в отличие от газовых котлов варьируется в широких пределах. Помимо основного тарифа, зависящего от потребленного количества электроэнергии, есть также двух- и трехзональные тарифы, учитывающие время суток. Так, в ночное время стоимость электроэнергии составляет 0,4 от дневной. Во время пиковой нагрузки стоимость повышается до 1,5 от дневной. В зависимости от различных внешних

факторов эти коэффициенты могут изменяться. Таким образом, электроэнергия может отпускаться как минимум по девяти различным тарифам.

На рис. 3. представлены графики зависимости минимальной и максимальной себестоимости тепловой энергии, получаемой в ТНУ, в режимах “отопление” и “охлаждение”.

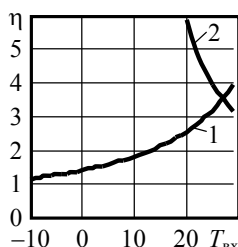


Рис. 2. Зависимость коэффициента η от $T_{вх}$:
1 — для отопления; 2 — для охлаждения

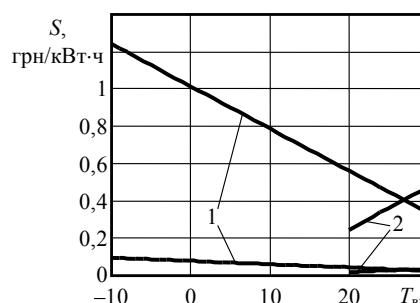


Рис. 3. Зависимость минимальной и максимальной себестоимости S от $T_{вх}$: 1 — для отопления; 2 — для охлаждения

Стоит также отметить, что эффективность ТНУ повышается с ростом мощности установки. Это связано с использованием принципиально других конструкций компрессоров, обладающих более высоким КПД, а также более эффективных теплообменных аппаратов. Так для ТНУ мощностью 600...1000 кВт коэффициент $K_{комп}$ может изменяться в диапазоне 0,55...0,75, что почти в 4 раза снижает себестоимость тепловой энергии по сравнению с маломощными установками.

Результаты. Обобщенные данные по изменению себестоимости тепловой энергии, генерируемой различными источниками, приведены в таблице. Данные применимы для городского района, состоящего из 200 домов, с суммарной тепловой нагрузкой в 70 МВт.

Результаты анализа себестоимости тепловой энергии от различных источников

Тепловой источник	Минимальная себестоимость тепловой энергии, грн/кВт·ч	Максимальная себестоимость тепловой энергии, грн/кВт·ч	Факторы, влияющие на себестоимость
Централизованное отопление	0,066	0,423	Эффективность котлов, состояние теплоизоляции трубопроводов, уровень протечек теплоносителя, используемый тариф на газ
Децентрализованное газовое отопление	0,067	0,25	Эффективность котлов, используемый тариф на газ
Индивидуальное отопление тепловым насосом	0,005	1,242	Мощность установки, температура окружающей среды, используемый тариф на электроэнергию

Выводы. Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд важных выводов:

— централизованное отопление при идеальном состоянии тепловых сетей и одинаковой цене за газ может конкурировать с индивидуальным газовым отоплением, только если котельная отапливает менее 30 домов с суммарной тепловой нагрузкой 10,5 МВт. Принимая текущее состояние тепловых сетей, эта величина может снижаться до 10 домов с суммарной тепловой нагрузкой 3,5 МВт;

— так как диапазоны изменения себестоимости тепловой энергии, получаемой в различных тепловых источниках, перекрываются, а конкретная цена тепловой энергии зависит от таких параметров, как время суток и температура окружающей среды, потенциально возможно решение задачи оптимизации процесса отопления;

— новые системы отопления, а по возможности и старые, должны комплектоваться как минимум двумя источниками тепла: газовым котлом и ТНУ. Такие системы позволят в полной мере использовать влияние всех факторов, определяющих изменение стоимости тепловой энергии;

— снижение себестоимости тепловой энергии, получаемой в ТНУ, определяемое ростом мощности установки, делает актуальными исследования целесообразности перехода от индивидуального теплоснабжения отдельных квартир к теплоснабжению отдельных домов или даже группы домов;

— оптимальное управление системами отопления городских районов должно базироваться на принципах управления структурой технических средств по критерию минимума стоимости получаемого тепла;

— при учете электроэнергии желательно переходить на трехзонные тарифы, что позволит получать дешевую тепловую энергию в ночное время.

Литература

1. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system / X.S. Jiang, Z.X. Jing, Y.Z. Li, Q.H. Wu, W.H. Tang // *Energy*. — 2014. — Vol. 64. — PP. 375 — 388.
2. Reduction of primary energy needs in urban areas through optimal planning of district heating and heat pump installations / V. Verda, E. Guelpa, A. Kona, S. Lo Russo // *Energy*. — 2012. — Vol. 48. — PP. 40 — 46.
3. Кузнецов, Г.В. Затопление каналов тепловых сетей: причины и последствия / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // *Новости теплоснабжения*. — 2006. — № 8. — С. 49 — 50.
4. Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку теплоты отопительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий: методические указания. — 4-е изд. — М.: АКХ им. Памфилова, 2002. — 129 с.
5. Машенков, А.Н. О контроле состояния тепловых сетей / А.Н. Машенков, А.В. Филимонов // *Новости теплоснабжения*. — 2003. — № 10. — С. 37 — 40.

References

1. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system / X.S. Jiang, Z.X. Jing, Y.Z. Li, Q.H. Wu, W.H. Tang // *Energy*. — 2014. — Vol. 64. — pp. 375 — 388.
2. Reduction of primary energy needs in urban areas through optimal planning of district heating and heat pump installations / V. Verda, E. Guelpa, A. Kona, S. Lo Russo // *Energy*. — 2012. — Vol. 48. — pp. 40 — 46.
3. Kuznetsov, G.V. Zatoplenie kanalov teplovykh setey: prichiny i posledstviya [Inundation of heat network channels: causes and effects] / G.V. Kuznetsov, V.Yu. Polovnikov // *Novosti teplosnabzheniya* [Heat Supply News]. — 2006. — #8. — pp. 49 — 50.
4. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu raskhodov topliva, elektroenergii i vody na vyrabotku teploty otopitel'nykh kotel'nykh kommunal'nykh teploenergeticheskikh predpriyatiy: metodicheskie ukazaniya [Operational Instructions on Determination of Fuel, Electricity and Water Consumption for Heat Generation by Boiler Houses of Public Heat-and-Power Engineering Companies: operational Instructions]. — 4th edition. — Moscow, 2002. — 129 p.
5. Mashenkov, A.N. O kontrole sostoyaniya teplovykh setey [On the control of heat networks' state] / A.N. Mashenkov, A.V. Filimonov // *Novosti teplosnabzheniya* [Heat Supply News]. — 2003. — #10. — pp. 37 — 40.

АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

С.В. Бабіч, В.О. Давидов. Аналіз економічної ефективності систем теплопостачання міських районів. Опалення сучасного українського міста надає середньому споживачеві обмежений вибір: або централізоване опалення, або індивідуальне опалення на основі газових котлів. У рідкісних випадках індивідуальні системи опалення додатково комплектуються тепловими насосами. Перехід від використання одиничного джерела теплової енергії до суперпозиції двох і більше альтернативних джерел дозволяє сформулювати і розв'язати завдання оптимізації теплопостачання міських районів. В роботі проведено оцінку собівартості теплової енергії, одержуваної від різних джерел. По-

казано, що системи індивідуального опалення при існуючому зносі теплових мереж можуть становити суттєву конкуренцію централізованому опаленню. Впровадження систем опалення з альтернативними джерелами тепла дозволить шляхом управління структурою цих систем оптимізувати завдання теплопостачання міських районів. При цьому висока ефективність процесу теплопостачання забезпечується не просто вибором максимально ефективного джерела тепла, а вибором джерела, що забезпечує в даний момент часу теплову енергію з мінімальною собівартістю.

Ключові слова: система опалення, тепла мережа, розподіл тепла, управління структурою.

С.В. Бабич, В.О. Давыдов. Анализ экономической эффективности систем теплоснабжения городских районов. Отопительная система современного украинского города предоставляет среднему потребителю ограниченный выбор: либо централизованное отопление; либо индивидуальное отопление на основе газовых котлов. В редких случаях индивидуальные системы отопления дополнительно комплектуются тепловыми насосами. Переход от использования единичного источника тепловой энергии к суперпозиции двух и более альтернативных источников позволяет сформулировать и решить задачу оптимизации теплоснабжения городских районов. В данной работе проведена оценка себестоимости тепловой энергии, получаемой от различных источников. Показано, что системы индивидуального отопления при существующем износе тепловых сетей могут составлять существенную конкуренцию централизованному отоплению. Внедрение систем отопления с альтернативными источниками тепла позволит путем управления структурой этих систем оптимизировать задачу теплоснабжения городских районов. При этом высокая эффективность процесса теплоснабжения обеспечивается не просто выбором максимально эффективного источника тепла, а выбором источника, обеспечивающего в данный момент времени тепловую энергию с минимальной себестоимостью.

Ключевые слова: система отопления, тепловая сеть, распределение тепла, управление структурой.

S.V. Babich, V.O. Davydov. Analysis of economic efficiency of heat supply systems of city districts. The heat supply system of a contemporary Ukrainian city provides an average consumer with a limited choice: either the centralized heating, or individual heating on the basis of gas boilers. In rare instances individual heat supply systems are additionally completed with thermal pumps. Transition from the use of a single source of thermal energy to superposition of two and more alternative sources allows to formulate and solve a problem of optimization of city districts heat supply. In this work the assessment of prime cost of thermal energy received from various sources is carried out. It is shown that individual heat supply systems under the existing wear of thermal networks can become quite competitive to the centralized heat supply systems. Meanwhile, high efficiency of the heat supply process can be provided not simply by choosing the most effective source of heat, but by choosing the source providing thermal energy with the minimum prime cost at the moment.

Keywords: heat supply system, thermal network, heat distribution, management of structure.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Максимов М.В.

Поступила в редакцию 24 апреля 2014 г.

УДК 621.313.33:629.423.24

Д.О. Кулагін, канд. техн. наук, доц., Запорізь. нац. техн. ун-т

ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ НАСИЧЕННЯ МАГНІТНИХ КІЛ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Вступ. В залежності від багатьох обставин для досягнення оптимальних режимів роботи тягових асинхронних двигунів, з метою отримання кутових швидкостей обертання таких двигунів вище за номінальну, при оптимізації енергетичних характеристик тягової електропередачі в залежності від навантаження на тягову передачу та при оптимізації динамічних характерис-

DOI: 10.15276/opu.1.43.2014.25

© Д.О. Кулагін, 2014