

УДК 620:621.31

**Никитин Е.Е., Федоренко В.Н.***Институт газа НАН Украины*

## ВЫБОР ТЕПЛООВОГО ИСТОЧНИКА В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ СУММАРНЫХ ЗАТРАТ

Розроблена методика і викона-ні розрахункові дослідження сумарних витрат за період життєвого циклу різних джерел теплової енергії. Проаналізовано вплив факторів на співвідношення сумарних витрат для розглянутих теплових джерел.

Разработана методика и выпол-нены расчетные исследования суммарных затрат за период жизненного цикла различных источников тепловой энергии. Проанализировано влияние различных факторов на соотношение суммарных затрат для рассмотренных тепловых источни-ков.

The methodology is developed and estimated research of the total cost for a life cycle period of different heat energy sources is carried out. The influence of various factors on the ratio of total cost for the above examined heat sources is analysed.

$n$  – продолжительность жизненного цикла теплового источника, лет;

ГК – газовые котлы;

З – суммарные затраты за период жизненного цикла теплового источника, грн.;

К – капитальные затраты на основное, вспомогательное оборудование, проектирование и монтаж теплового источника, грн.;

КГУ – когенерационные установки;

КК – конденсационные котлы;

КЩ – котлы на щепе;

ТА – тепловые аккумуляторы;

ТН – тепловые насосы;

При выборе вида источника тепловой энергии в системах теплоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий существует целый ряд альтернативных решений. Так при необходимости обеспечения потребителей тепловой энергией в виде горячей воды могут быть рассмотрены следующие тепловые источники: газовые котлы, газовые конденсационные котлы, автоматизированные котлы на щепе, тепловые насосы, использующие сбросную тепловую энергию канализационных стоков, комбинированные тепловые источники в составе теплового насоса и газопоршневой когенерационной установки с электрической мощностью, необходимой для привода теплового насоса, электродкотлы и электродкотлы с тепловым аккумулятором.

Водогрейные котлы на природном газе в

$\mathcal{E}_{\text{изп}}$  – годовые затраты на заработную плату персонала, грн.;

$\mathcal{E}_{\text{ито}}$  – годовые затраты на техническое обслуживание, грн.;

$\mathcal{E}_{\text{тэр}}$  – годовые затраты на топливно-энергетические ресурсы (природный газ, электроэнергию, щепу), грн.;

ЭК – электродкотлы.

### **Индексы нижние:**

зп – заработная плата персонала;

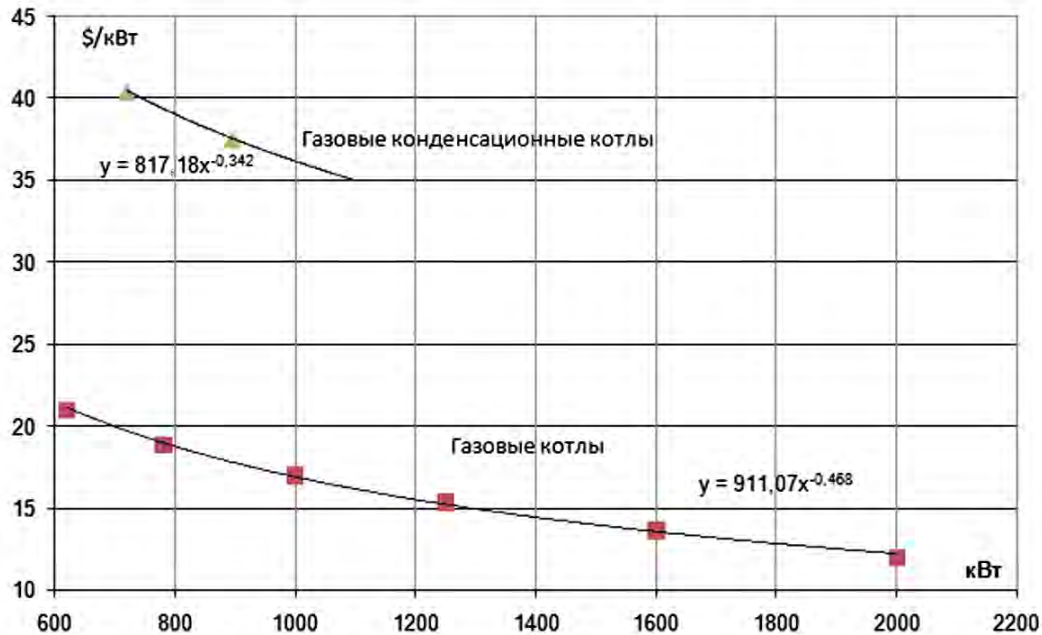
то – техническое обслуживание;

тэр – топливно-энергетические ресурсы.

настоящее время являются наиболее распространенными источниками тепловой энергии. Основным преимуществом водогрейных котлов на природном газе являются относительно низкая цена (рис. 1) и достаточно высокий коэффициент полезного действия, достигающий 95 %. Однако непрерывный рост цены природного газа принуждает к поиску других тепловых источников.

Более экономичным источником тепловой энергии являются водогрейные конденсационные котлы, коэффициент полезного действия которых (в расчете на низшую рабочую теплоту сгорания топлива) достигает 105 %. Однако их стоимость существенно превышает стоимость обычных водогрейных котлов (рис. 1).

Существенное снижение затрат на топливо может быть достигнуто при переходе с природ-



**Рис. 1. Зависимость удельной цены водогрейных котлов от мощности (на примере котлов Viessmann).**

ного газа на альтернативные виды топлива, в частности на щепу, стоимость которой, с учетом ее теплотворной способности, существенно меньше, чем стоимость природного газа. Имеется большой выбор автоматизированных котлов для сжигания щепы, которые дороже котлов на газе. Кроме того, эксплуатация котлов на щепе связана с дополнительными расходами на электроэнергию, заработную плату персонала и техническое обслуживание (табл. 1).

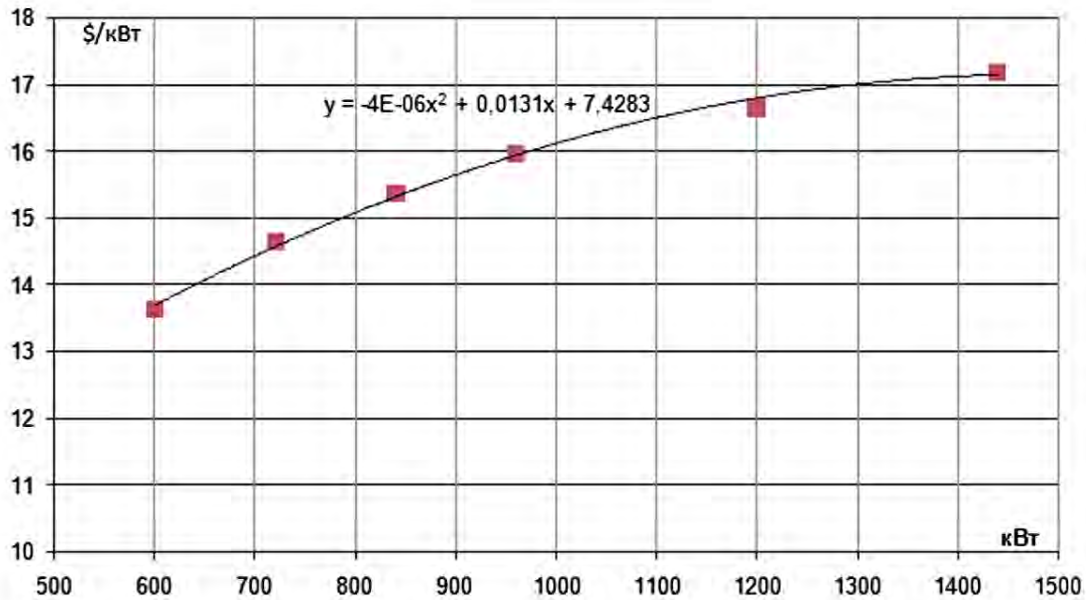
Все более широкое применение в индустриально развитых странах получают тепловые насосы, использующие низкопотенциальную тепловую энергию окружающей среды. Одним из наиболее экономически эффективных источников низкопотенциальной тепловой энергии для тепловых насосов являются городские канализационные стоки, при этом коэффициент трансформации теплового насоса достигает 3 и выше. Основным сдерживающим фактором в использовании тепловых насосов является их высокая стоимость (табл. 1), а также стоимость теплообменного оборудования, необходимого для извлечения низкопотенциальной тепловой энергии. Кроме того, необходимо учитывать, что технико-экономическая эффективность тепловых насосов сни-

жается с ростом цены электрической энергии по сравнению с ценой природного газа.

В работах [1, 2] рассматриваются комбинированные тепловые источники, состоящие из теплового насоса и когенерационной установки. Эти источники обладают более высокой технико-экономической эффективностью, которая не зависит от цены электроэнергии, так как они потребляют только природный газ. Однако эти тепловые источники имеют высокую стоимость (табл. 1).

Достаточно широкое распространение получили электродкотлы [3], их основное преимущество – низкая стоимость (рис. 2), а недостаток – высокие затраты на электроэнергию.

Этот недостаток может быть в некоторой степени скомпенсирован использованием дешевой ночной электроэнергии при наличии бака-аккумулятора. Однако при этом установленная мощность электродкотла должна быть больше, чем установленная мощность электродкотла без аккумулятирования во столько раз, во сколько раз время разрядки бака-аккумулятора меньше, чем время зарядки (примерно в три раза). Кроме того, капитальные затраты увеличиваются на стоимость бака-аккумулятора (примерно 150 \$/м<sup>3</sup>) значительного объема



**Рис. 2. Зависимость удельной стоимости электродов от мощности (на примере электродов НПП «Электротепломаш»).**

(460 м<sup>3</sup> для котла, обеспечивающего круглосуточную тепловую нагрузку около 1 МВт).

Таким образом, каждый из вышеупомянутых источников тепловой энергии имеет определенные преимущества и недостатки. В качестве критерия оптимизации выбора теплового источника целесообразно использовать критерий минимизации суммарных затрат за период жизненного цикла теплового источника [4]. Этот критерий может быть записан в виде:

$$Z = K + \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{\text{итэр}} + \mathcal{E}_{\text{изп}} + \mathcal{E}_{\text{ито}}. \quad (2)$$

Ниже рассматривается методика сравнительного анализа суммарных затрат за период жизненного цикла упомянутых выше тепловых источников. Разработанная методика позволяет выполнять сравнительный анализ при различных значениях параметров, влияющих на величину суммарных затрат. Значения исходных параметров и расчетных величин, включая величину суммарных и капитальных затрат для базового варианта, представлены в табл. 1. Сравняются тепловые источники с одинаковой тепловой мощностью 1 МВт (за

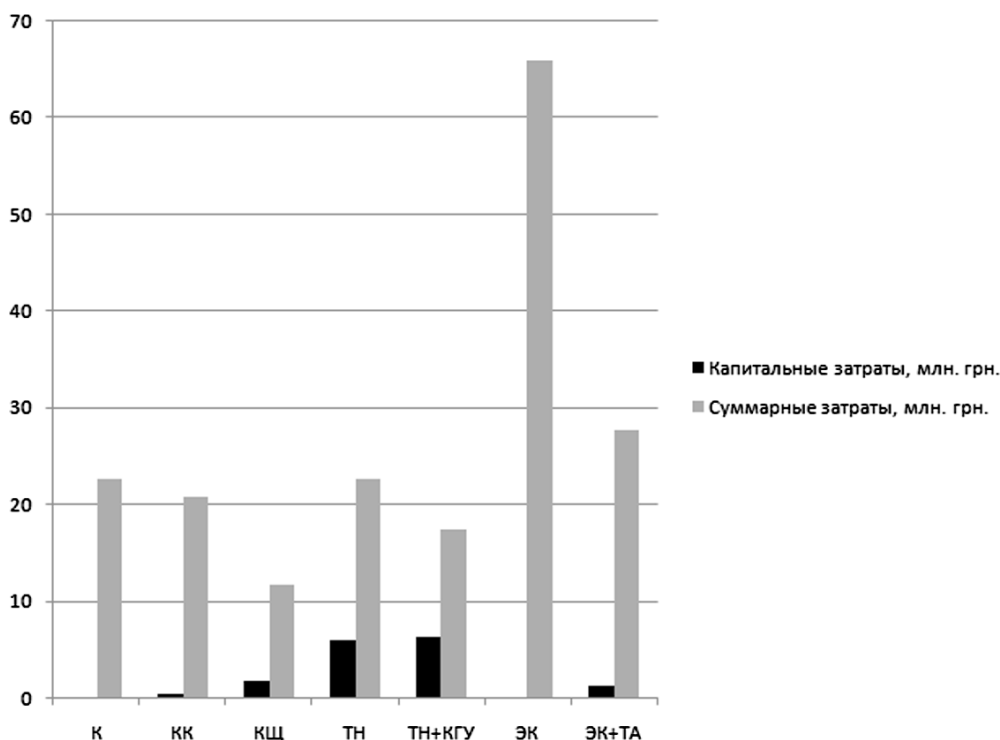
исключением электродов с тепловым аккумулятором, установленная мощность которого определяется исходя из соотношения продолжительности зарядки и разрядки теплового аккумулятора), годовой продолжительностью работы, коэффициентом использования установленной мощности и годовой выработкой тепловой энергии.

Результаты сравнения суммарных (за период 10 лет) и капитальных затрат для различных тепловых источников представлены на рис. 3. Анализ приведенных данных показывает, что доля капитальных затрат по сравнению с суммарными затратами для различных тепловых источников существенно различается. Для электродов, газовых, газовых конденсационных котлов и электродов с тепловыми аккумуляторами эта доля незначительна и составляет 0,3...4,7 %. Для автоматизированных котлов на щепе, тепловых насосов и комбинированных тепловых источников, состоящих из тепловых насосов и когенерационных установок, доля капитальных затрат более существенна и составляет 15,6; 27 и 37 % соответственно. Однако для всех тепловых источников доля эксплуатационных затрат за период 10 лет является доминирующей.

Табл. 1. Сравнение тепловых источников

Параметр, размерность	Вид теплового источника						
	ГК	КК	КЩ	ТН	ТН+КГУ	ЭК	ЭК+ТА
Установленная тепловая мощность, МВт	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00
Коэффициент использования установленной мощности	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,27
Годовая продолжительность работы, час	8000,00	8000,00	8000,00	8000,00	8000,00	8000,00	8000,00
Жизненный цикл проекта, лет	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Стоимость природного газа, грн/1000 м <sup>3</sup>	3000,00	3000,00	-	-	3000,00	-	-
Стоимость электроэнергии, грн/кВт·ч	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40
Стоимость щепы, грн/т	-	-	500,00	-	-	-	-
Калорийность природного газа, ккал/м <sup>3</sup>	8000,00	8000,00	-	-	8000,00	-	-
Калорийность щепы, ккал/кг	-	-	4100,00	-	-	-	-
КПД котла	0,95	1,05	0,84	-	-	0,98	0,98
КПД КГУ (тепловой)	-	-	-	-	0,50	-	-
КПД КГУ (электрический)	-	-	-	-	0,38	-	-
СОР теплового насоса	-	-	-	4,00	4,00	-	-
Электрическая мощность, кВт	5,10	5,10	16,90	250,00	188,12	1000,00	3000,00
Затраты на ТО, ¢/кВт·ч	0,01	0,01	0,02	0,05	0,10	0,01	0,01
Месячная заработная плата одного работника, грн/МВт	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
Количество работников	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Удельные кап. затраты на тепловой источник, \$/кВт	17,00	37,00	120,00	400,00	456,44	16,00	16,00
Годовое потребление природного газа, тыс. м <sup>3</sup>	725,95	656,81	-	-	340,59	-	-
Годовые затраты на природный газ, тыс. грн	2177,86	1970,44	-	-	1021,78	-	-
Годовое потребление электроэнергии, тыс. кВт·ч	32,64	32,64	108,16	1600,00	-	6530,61	6530,61
Годовые затраты на электроэнергию, тыс. грн	32,64	32,64	108,16	1600,00	-	6530,61	2612,24
Годовое потребление щепы, тыс. кг	-	-	1601,99	-	-	-	-
Годовые затраты на щепу, тыс. грн	-	-	800,99	-	-	-	-

Годовые затраты на ТО, тыс. грн	5,12	5,12	10,24	25,60	51,20	5,12	5,12
Годовые затраты на зарплату персонала, тыс. грн	24,00	24,00	72,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Годовые эксплуатационные затраты, млн. грн	2,24	2,03	0,99	1,65	1,1	6,56	2,64
Затраты на основное оборудование, тыс. грн	136,0	296,0	960,0	3200,0	3651,5	128,0	935,72
Затраты на дополнительное оборудование, тыс. грн	40,8	88,8	384,0	1280,0	1095,4	38,4	280,7
Затраты на проектирование, тыс. грн	8,840	19,240	80,640	268,800	284,816	8,320	60,8227
Затраты на монтаж, тыс. грн	53,04	115,44	403,20	1344,00	1424,08	49,92	36,49
Всего капитальных затрат, тыс. грн	238,68	519,48	1827,84	6092,80	6455,83	224,64	1313,76
Расход газа на производство тепловой энергии м <sup>3</sup> /Гкал	131,58	119,05	-	-	61,73	-	-
Эксплуатационные затраты за период проекта, млн. грн	22,40	20,32	9,91	16,50	10,97	65,60	26,41
Суммарные затраты за период проекта, млн. грн	22,63	20,84	11,74	22,59	17,43	65,82	27,73



**Рис. 3. Капитальные и суммарные затраты (за период 10 лет) для различных тепловых источников. Базовый вариант (табл. 1).**



Таким образом, определяющим фактором формирования суммарных затрат является экономичность теплового источника.

Величины суммарных затрат для различных тепловых источников существенно различаются. При существующих ценах на оборудование, энергоносители и определенных значениях других параметров (табл. 1) рассмотренные виды оборудования в порядке возрастания суммарных затрат располагаются следующим образом: котлы на щепе (11,74), комбинированные тепловые источники в составе тепловых насосов и когенерационных установок (17,43), газовые конденсационные котлы (20,84), ТН (22,59), газовые котлы (22,63), электрокотлы с тепловыми аккумуляторами (27,73), электрокотлы (65,82 млн. грн.).

Таким образом, наиболее экономически целесообразным источником тепловой энергии является автоматизированный котел на древесной щепе. Суммарные затраты за десятилетний период эксплуатации этого теплового источника в 1,9 раза меньше, чем при использовании традиционных газовых котлов. Возможность и экономическая целесообразность использования этого теплового источника определяется наличием и ценой древесной щепы в каждом конкретном населенном пункте.

Наиболее эффективным источником тепловой энергии на природном газе, доминирующим видом топлива на сегодняшний день, является комбинированный тепловой источник, состоящий из теплового насоса и когенерационной установки. Суммарные затраты за десятилетний период эксплуатации этого теплового источника в 1,3 раза меньше, чем при использовании традиционных газовых котлов.

Как видно из приведенных выше данных, использование электрокотлов для производства тепловой энергии при существующих ценах на энергоносители является экономически нецелесообразным, так как суммарные затраты за десятилетний период эксплуатации более чем в три раза превышают суммарные затраты при использовании традиционного газового котла. При использовании электрокотлов с тепловы-

ми аккумуляторами при льготном ночном тарифе на электроэнергию – 40 % от одноставочного тарифа, суммарные затраты снижаются в 2,7 раза, однако остаются большими по сравнению с традиционным газовым водогрейным котлом.

Рассмотренные выше соотношения суммарных затрат для различных тепловых источников справедливы только при определенных значениях влияющих параметров (табл. 1). Ниже проанализировано влияние некоторых параметров на соотношение суммарных затрат для различных тепловых источников.

Увеличение жизненного цикла проектов делает применение дорогостоящего высокоэффективного оборудования (котлов на щепе, конденсационных котлов, тепловых насосов и когенерационных установок) более целесообразным. Однако в диапазоне 7...15 лет приоритеты использования различных тепловых источников остаются такими же, как указано выше.

Снижение годовой продолжительности эксплуатации оборудования и коэффициента использования установленной мощности снижает экономическую целесообразность применения дорогостоящего высокоэффективного оборудования. Так при уменьшении годовой продолжительности работы оборудования с 8000 до 4000 часов и коэффициента использования установленной мощности с 0,8 до 0,5 применение тепловых насосов и комбинированных тепловых источников, состоящих из тепловых насосов и когенерационных установок, вместо газовых котлов становится экономически нецелесообразным. При этом сохраняется экономическая целесообразность применения котлов на щепе.

Основным параметром, оказывающим влияние на соотношение суммарных затрат для тепловых источников, использующих природный газ и электроэнергию, является цена этих энергоносителей.

При цене электроэнергии 1 грн./кВт·ч применение тепловых насосов становится экономически целесообразным при цене природного газа выше 2700 грн./1000 м<sup>3</sup>. При увеличении

цены природного газа выше 3300 грн./1000 м<sup>3</sup> экономически целесообразным становится применение электрокотлов с тепловыми аккумуляторами, использующим электрическую энергию по льготному ночному тарифу (рис. 4).

Основным параметром, определяющим экономическую целесообразность использования котлов на щепе, является стоимость этого вида топлива.

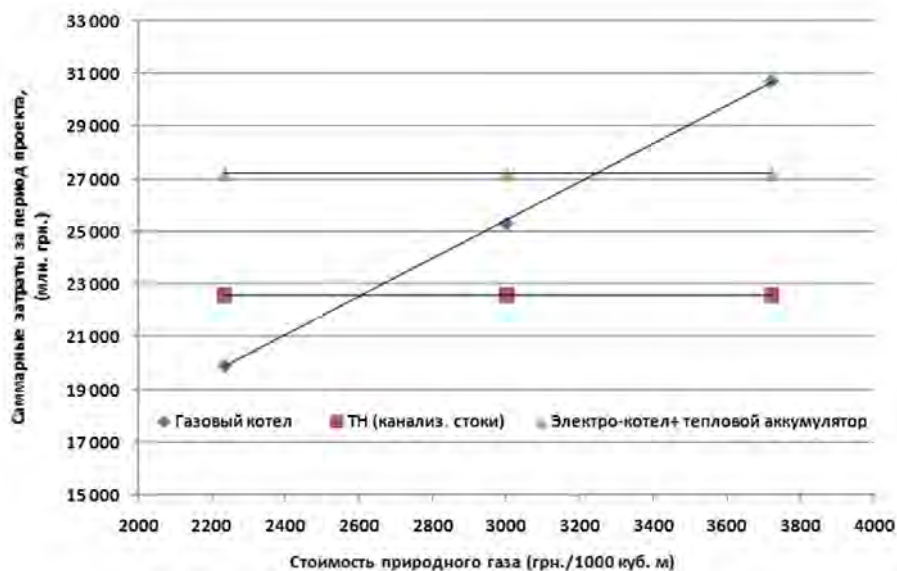
При цене природного газа 3000 грн./1000 м<sup>3</sup> максимальная цена щепы, при которой ее использование остается экономически обоснованным, составляет около 750 грн./тонну. При росте цены природного газа до 4000 грн./1000 м<sup>3</sup> максимальная экономически обоснованная цена щепы возрастает до 1100 грн./тонну (рис. 5).

Результаты приведенных выше сравнений источников тепловой энергии по критерию суммарных затрат справедливы при условии, что затраты на подключение тепловых источников к газовым, электрическим сетям и тепловым потребителям, а также затраты на транспортировку и потери в сетях различаются не существенно. В противном случае сравнение необходимо проводить с учетом этих затрат, что может существенным образом повлиять на выбор теплового источника.

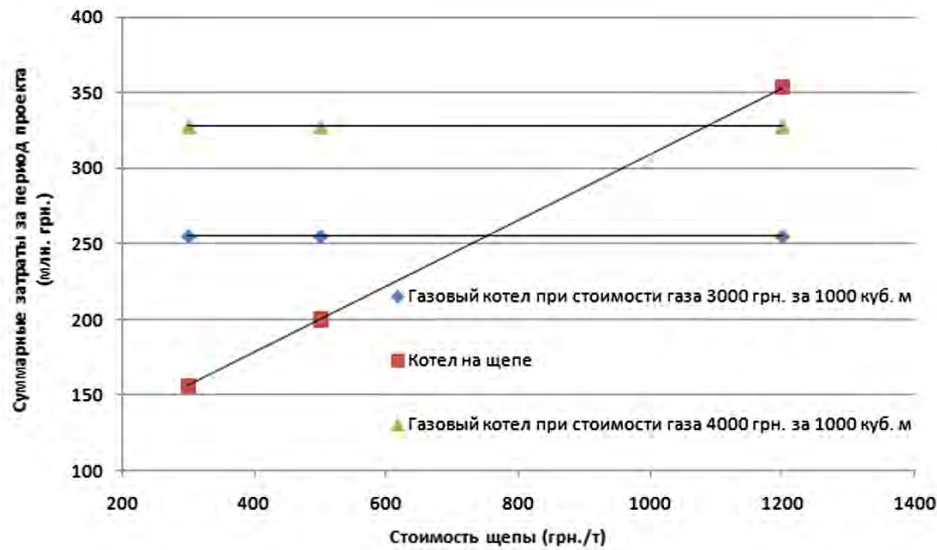
Характерным примером является использование тепловых насосов, расположенных на городских канализационных станциях, которые, как правило, расположены на определенном удалении от тепловых потребителей. Разработано методическое обеспечение и выполнен анализ дополнительных затрат, связанных со строительством трубопровода, затратами на перекачку теплоносителя и тепловыми потерями.

Расчеты показывают, что при существующих ценах на предварительно изолированные трубы, оборудование и энергоносители (табл. 1) экономически обоснованное расстояние от теплонасосной станции, использующей сбросную тепловую энергию городских канализационных стоков, до теплового потребителя, которым может быть ближайшая районная котельная, составляет около 1000 метров. Для комбинированного теплового источника в составе теплового насоса и когенерационной установки это расстояние составляет около 3000 метров.

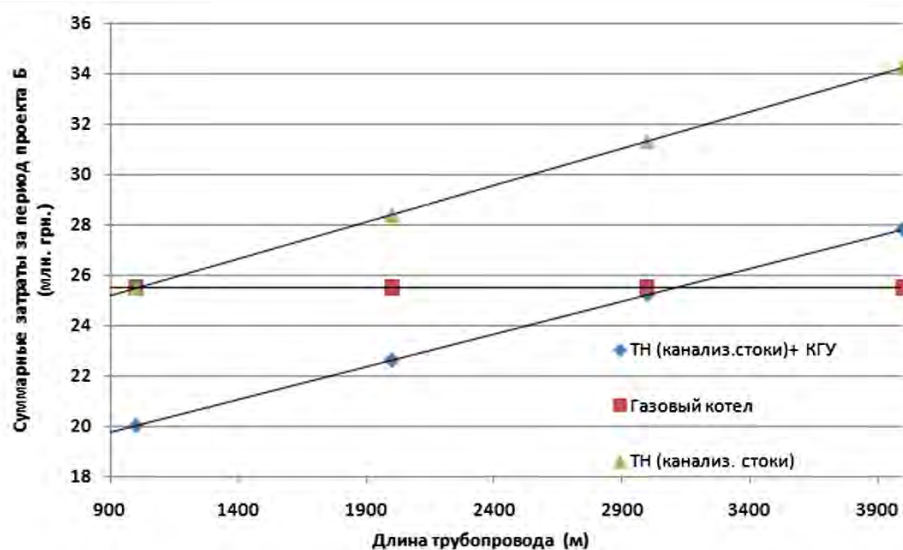
При изменении мощности сравниваемых тепловых источников удельные капитальные затраты (рис. 1, 2), а следовательно и соотношение суммарных затрат изменятся, что окажет влияние на выбор теплового источника.



**Рис. 4. Изменение суммарных затрат в зависимости от цены природного газа (при цене электроэнергии 1 грн./кВт·ч).**



*Рис. 5. Сравнение суммарных затрат для котлов на природном газе и щепе при различной цене этих топлив.*



*Рис. 6. Влияние удаленности ТН и комбинированного теплового источника в составе ТН + КГУ от теплового потребителя на величину суммарных затрат по сравнению с ГК.*

Разработанный методический подход позволяет сравнивать тепловые источники в широком диапазоне изменения мощностей.

### **Выводы**

Разработана методика и выполнен расчетный анализ суммарных затрат для различных источников тепловой энергии.

Доля капитальных затрат по сравнению с суммарными затратами для различных тепло-

вых источников существенно различается. Для электроджетов, газовых, газовых конденсационных котлов и электроджетов с тепловыми аккумуляторами эта доля незначительна и составляет 0,3... 4,7 %. Для автоматизированных котлов на щепе, тепловых насосов и комбинированных тепловых источников в составе тепловых насосов и когенерационных установок доля капитальных затрат более существенна



и составляет 15,6; 27 и 37 % соответственно. Однако для всех тепловых источников доля эксплуатационных затрат за 10-летний период является доминирующей. Таким образом, определяющим фактором формирования суммарных затрат является экономичность теплового источника.

При существующих ценах на оборудование и энергоносители рассмотренные тепловые источники в порядке возрастания суммарных затрат располагаются следующим образом: котлы на щепе, комбинированные тепловые источники в составе тепловых насосов и когенерационных установок, газовые конденсационные котлы, тепловые насосы, газовые котлы, электродкотлы с тепловыми аккумуляторами, электродкотлы.

Разработанная методика позволяет проанализировать влияние различных факторов на соотношение суммарных затрат для рассмотренных тепловых источников: цены природного газа, электроэнергии и щепы, годового периода эксплуатации оборудования, удаленности теплонасосной установки, использующей сбросную тепловую энергию городских канализационных стоков от теплового потребителя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Никитин Е.Е.* Техничко-економическая ефективность воздушных тепловых насосов с приводом от газопоршневых когенерационных установок в системах горячего водоснабжения // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 4. – С. 19-24.

2. *Султангузин И.А., Албул А.В., Потапова А.А., Говорин А.В.* Анализ энергетической эффективности использования природного газа для систем теплоснабжения с тепловыми насосами // Science & Technology in Gas Industry. – 2011. – № 1.

3. *Долінський А.А., Розінський Д.Й.* Сучасний стан і основні напрямки застосування електричної енергії для теплопостачання в Україні. – К.: Видавництво Купріянова О.О., 2009. – 252 с.

4. *Жовтянський В.А., Кулик М.М., Стогній Б.С.* Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали в 2-х томах: Механізми реалізації політики енергозбереження. – К.: Академперіодика, 2006.

*Получено 06.03.2012 г.*