

Энергосберегающие технологии

УДК 621.1.016.4:669.183.213

Технико-экономическая эффективность воздушных тепловых насосов с приводом от газопоршневых когенерационных установок в системах горячего водоснабжения

Никитин Е.Е.

Институт газа НАН Украины, Киев

Выполнен сравнительный анализ технико-экономической эффективности комбинированных тепловых источников в составе тепловых насосов типа «воздух — вода» с приводом от газопоршневых когенерационных установок и традиционных газовых водогрейных котлов в системах горячего водоснабжения.

Ключевые слова: тепловой насос, газопоршневая когенерационная установка, экономия природного газа.

Виконано порівняльний аналіз техніко-економічної ефективності комбінованих теплових джерел у складі теплових насосів типу «повітря — вода» з приводом від газопоршневих когенераційних установок та традиційних газових водогрійних котлів у системах гарячого водопостачання.

Ключові слова: тепловий насос, газопоршнева когенераційна установка, економія природного газу.

Современное состояние централизованных систем теплоснабжения населенных пунктов Украины характеризуется значительным физическим и моральным износом оборудования. Доминирующим видом топлива является природный газ, цена которого непрерывно возрастает. При этом возрастание цены отпускаемой тепловой энергии, прежде всего для населения, ограничено платежеспособным спросом на нее.

С целью снижения себестоимости отпускаемой тепловой энергии делаются попытки замещения дорогостоящего природного газа местными видами топлива, нетрадиционными и возобновляемыми источниками энергии. Не пренебрегая важности этого направления, следует отметить, что процесс замещения природного газа другими источниками энергии может

носить только постепенный и долговременный характер.

Можно прогнозировать, что в ближайшие десятилетия доминирующим видом топлива в коммунальной теплоэнергетике Украины будет оставаться природный газ. В этих условиях будет актуальной замена устаревших газовых водогрейных котлов с низким КПД на современные высокоэффективные источники тепловой энергии.

На сегодняшний день в качестве наиболее эффективного источника тепловой энергии, использующего природный газ, можно рассматривать тепловые насосы с приводом от газопоршневых двигателей [1]. Схемы применения этих тепловых источников в системах теплоснабжения описаны в работах [2, 3]. Можно считать,

что в настоящее время отсутствуют технические проблемы, препятствующие широкомасштабному использованию таких тепловых источников. Задача заключается в определении той ниши для их использования, в которой они наиболее конкурентоспособны по сравнению с традиционными газовыми водогрейными котлами.

Основными проблемами применения рассматриваемых тепловых источников являются их высокая стоимость и большой срок окупаемости капитальных затрат. Поэтому целесообразно рассмотреть применение воздушных тепловых насосов с приводом от газопоршневых когенерационных установок для систем горячего водоснабжения в сочетании с баками-аккумуляторами горячей воды, принимая во внимание следующие соображения: 1) системы горячего водоснабжения в отличие от систем отопления работают круглогодично, что снижает срок окупаемости капитальных затрат примерно в 2 раза; 2) воздушные тепловые насосы могут применяться повсеместно и не требуют дополнительных грунтовых или водо-водяных теплообменников и трубопроводов для транспортировки теплоносителя, что уменьшает капиталовложения; 3) требуемая температура теплоносителя для горячего водоснабжения (ГВС) ниже, чем для отопления, что позволяет увеличить коэффициент трансформации тепловой энергии (COP); 4) применение бака-аккумулятора позволяет уменьшить установленную мощность теплового источника и соответственно снизить капиталовложения; 5) установка рассматриваемых систем в существующих газовых котельных позволяет при значительном понижении температуры наружного воздуха догревать горячую воду с помощью отопительных водогрейных котлов.

Рассматриваемый тепловой источник ГВС (рис.1) включает когенерационную установку (1), использующую природный газ (Г) и вырабатывающую электрическую (или механическую) энергию (Э) и тепловую энергию в виде горячей воды ГВ1. Энергия Э используется для привода компрессора теплового насоса 2, который преобразует низкопотенциальную тепловую

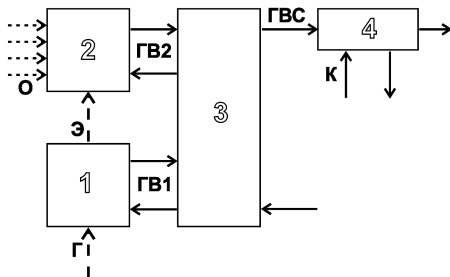


Рис.1. Схема теплового источника ГВС в составе теплового насоса, когенерационной установки и бака-аккумулятора.

энергию окружающего воздуха (О) в тепловую энергию горячей воды ГВ2. Тепловая энергия от когенерационной установки ГВ1 и теплового насоса ГВ2 аккумулируется в виде горячей воды в баке-аккумуляторе 3, из которого горячая вода подается в систему ГВС. При низкой температуре окружающего воздуха (меньше -10°C) приготовление горячей воды осуществляется с помощью бойлера горячего водоснабжения 4, подключенного к существующему водогрейному котлу.

Выполним анализ технико-экономической эффективности использования рассматриваемого теплового источника на примере воздушного теплового насоса AQUACIAT2 фирмы CIAT (характеристики теплового насоса предоставлены фирмой Клима Комфорт), газопоршневой когенерационной установки и бака-аккумулятора горячей воды для областей Украины, имеющих различные температуры наружного воздуха.

Теплопроизводительность, потребляемая электрическая мощность и COP теплового насоса зависят от температуры наружного воздуха (рис.2–4).

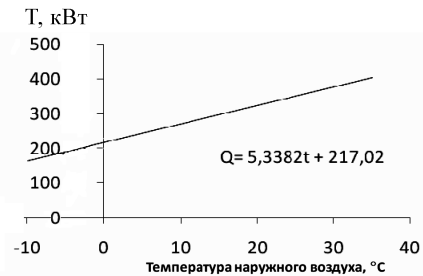


Рис.2. Теплопроизводительность теплового насоса.

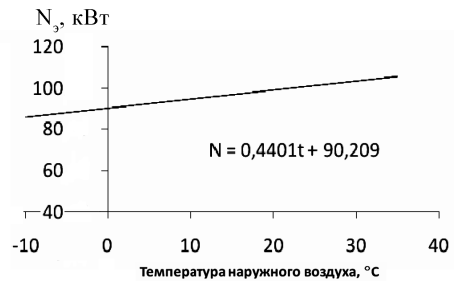


Рис.3. Электрическая мощность теплового насоса.

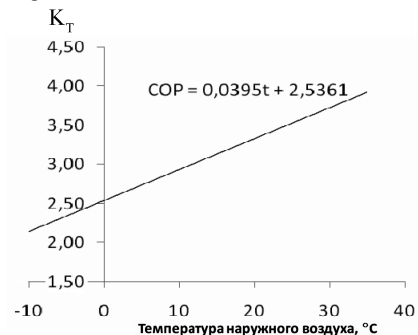


Рис.4. Коэффициент трансформации теплового насоса.

Таблица 1. Потребление и выработка ТЭР в климатических условиях Киевской обл.

Месяц	T, °C	COP	Тепловая мощность ТН, кВт	Электрическая мощность ТН, кВт	Время работы, ч	Выработка тепловой энергии ТН, кВт·ч	Расход газа в КГУ, м³/ч	Расход газа в КГУ, м³/мес	Тепловая мощность КГУ, кВт	Тепловая мощность ТН и КГУ, кВт	Σ, кВт·ч
1	-5,6	2,3	187,1	87,7	672,0	125748,7	23,0	15460,1	109,7	296,8	199454,1
2	-5,1	2,3	189,8	88,0	672,0	127542,4	23,1	15498,9	110,0	299,8	201432,5
3	-0,3	2,5	215,4	90,1	672,0	144761,3	23,6	15871,1	112,6	328,0	220425,9
4	7,8	2,8	258,7	93,6	672,0	173818,1	24,6	16499,2	117,1	375,7	252477,2
5	15,1	3,1	297,6	96,9	672,0	200005,2	25,4	17065,3	121,1	418,7	281363,0
6	17,9	3,2	312,6	98,1	672,0	210049,6	25,7	17282,4	122,6	435,2	292442,5
7	20,2	3,3	324,9	99,1	672,0	218300,3	26,0	17460,8	123,9	448,7	301543,5
8	19,6	3,3	321,6	98,8	672,0	216147,9	25,9	17414,2	123,5	445,2	299169,3
9	14,6	3,1	295,0	96,6	672,0	198211,6	25,3	17026,5	120,8	415,8	279384,5
10	7,7	2,8	258,1	93,6	672,0	173459,4	24,5	16491,5	117,0	375,1	252081,5
11	1,3	2,6	224,0	90,8	672,0	150500,9	23,8	15995,2	113,5	337,4	226757,0
12	-3,3	2,4	199,4	88,8	672,0	133999,4	23,3	15638,5	110,9	310,3	208555,1
Сумма	-	-	-	-	8064,0	2072544	-	197703	-	-	3015086
Среднее	7,5	2,8	257,0	93,5	-	-	-	-	116,9	373,9	-

Примечание. Σ – суммарная месячная выработка тепловой энергии.

Выбор электрической мощности газопоршневой когенерационной установки определяется потребляемой электрической мощностью теплового насоса. При среднегодовой температуре наружного воздуха 7,5 °C (Киевская обл.) потребляемая тепловым насосом электрическая мощность составляет 94 кВт, а тепловая мощность теплового насоса 257 кВт (рис.3). Если электрический и термический КПД газопоршневой когенерационной установки составляют 0,4 и 0,5 соответственно, то ее тепловая мощность составит 117 кВт, а суммарная средняя тепловая мощность теплового насоса и когенерационной установки 374 кВт. Максимальная тепловая мощность рассматриваемого теплового источника (при температуре наружного воздуха 35 °C) составляет 408 кВт, при этом необходимая электрическая мощность когенерационной установки составляет 104 кВт.

При изменении температуры наружного воздуха от -10 до +35 °C соответствующее значение COP увеличивается от 2,02 до 3,94, а значение этого коэффициента, соответствующее среднегодовой температуре 7,5 °C, составляет 2,8 (см. рис.4).

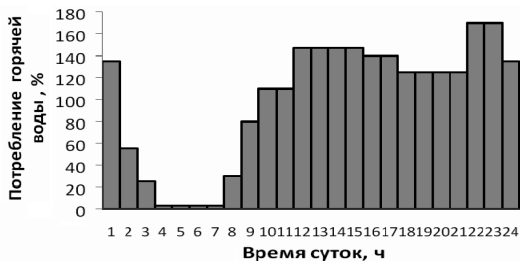


Рис.5. Суточный график потребления горячей воды в многоквартирном жилом доме.

Определение объема бака-аккумулятора осуществляется с учетом максимальной суммарной тепловой мощности теплового насоса и когенерационной установки на основании суточного графика потребления горячей воды (см. рис.5).

Методика выбора емкости бака-аккумулятора основана на построении интегральных суточных характеристиках потребления и выработки тепловой энергии (рис.6) [4].

Емкость бака-аккумулятора определяется максимальной разностью между линиями 1 и 2 (на рис.6 соответствует 9 ч). При мощности теплового источника 408 кВт и графике потребления горячей воды, характерном для многоквартирных жилых домов (рис.5), объем бака-аккумулятора с постоянной температурой и переменным объемом воды должен составлять 63300 л.

Данные о потреблении природного газа (с теплотворной способностью 8200 ккал/м³) и выработке тепловой энергии воздушным тепловым насосом и газопоршневой когенерационной установкой в климатических условиях Киевской обл. представлены в табл.1.



Рис.6. Интегральное потребление (1) и выработка (2) тепловой энергии.

Таблица 2. Значения среднемесячной температуры и COP для областей Украины

Область	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Среднегодовая
Крым	-1,0	-0,7	3,0	9,3	14,6	19,0	21,8	21,2	16,4	11,4	5,8	1,5	10,2
	2,5	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,4	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,9
Винницкая	-6,0	-5,3	-0,5	6,9	13,6	16,7	18,7	17,8	12,9	7,5	1,3	-3,4	6,7
	2,3	2,3	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,8
Волынская	-4,9	-3,9	0,5	7,3	13,7	17,0	18,6	17,6	13,2	7,7	2,3	-2,1	7,3
	2,3	2,4	2,6	2,8	3,1	3,2	3,3	3,2	3,1	2,8	2,6	2,5	2,8
Днепропетровская	-5,4	-4,8	0,4	9,0	16,4	19,8	22,3	21,3	15,7	8,8	2,0	-3,1	8,5
	2,3	2,3	2,6	2,9	3,2	3,3	3,4	3,4	3,2	2,9	2,6	2,4	2,9
Донецкая	-6,6	-6,2	-1,0	7,9	15,4	18,6	21,6	20,4	15,0	7,9	0,9	-4,2	7,5
	2,3	2,3	2,5	2,8	3,1	3,3	3,4	3,3	3,1	2,8	2,6	2,4	2,8
Житомирская	-5,7	-4,9	-0,4	7,0	13,9	17,0	18,9	17,8	13,1	7,2	1,3	-3,2	6,8
	2,3	2,3	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4	2,8
Закарпатская	-3,1	-0,7	4,8	10,0	15,6	18,4	20,5	19,7	16,5	9,7	4,9	0,1	9,7
	2,4	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3	3,3	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5	2,9
Запорожская	-3,8	-3,5	0,7	8,2	16,0	20,7	23,5	22,6	17,1	10,8	3,9	-1,2	9,6
	2,4	2,4	2,6	2,9	3,2	3,4	3,5	3,4	3,2	3,0	2,7	2,5	2,9
Ивано-Франковская	-5,1	-3,7	1,3	7,6	13,5	16,6	18,5	17,8	13,5	8,2	2,2	-2,4	7,3
	2,3	2,4	2,6	2,8	3,1	3,2	3,3	3,2	3,1	2,9	2,6	2,4	2,8
Киевская	-5,9	-5,2	-0,4	7,5	14,7	17,8	19,8	18,7	13,9	7,5	1,2	-3,5	7,2
	2,3	2,3	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,3	3,1	2,8	2,6	2,4	2,8
Кировоградская	-5,6	-5,1	-0,3	7,8	15,1	17,9	20,2	19,6	14,6	7,7	1,3	-3,3	7,5
	2,3	2,3	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,3	3,1	2,8	2,6	2,4	2,8
Луганская	-6,6	-6,0	-0,4	8,6	16,1	19,7	22,3	21,0	15,0	8,1	1,4	-3,8	8,0
	2,3	2,3	2,5	2,9	3,2	3,3	3,4	3,4	3,1	2,9	2,6	2,4	2,9
Львовская	-5,0	-4,2	0,3	6,7	12,7	15,2	17,4	16,5	13,0	7,7	2,4	-2,6	6,7
	2,3	2,4	2,5	2,8	3,0	3,1	3,2	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,8
Николаевская	-3,5	-2,8	2,1	9,4	16,5	20,3	23,2	22,2	17,0	10,5	3,9	-1,2	9,8
	2,4	2,4	2,6	2,9	3,2	3,3	3,5	3,4	3,2	3,0	2,7	2,5	2,9
Одесская	-2,5	-2,0	2,0	8,2	15,0	19,4	22,2	21,4	16,9	11,4	5,3	0,2	9,8
	2,4	2,5	2,6	2,9	3,1	3,3	3,4	3,4	3,2	3,0	2,7	2,5	2,9
Полтавская	-6,9	-6,4	-1,3	7,6	15,0	18,3	20,6	19,7	14,3	7,4	0,6	-4,5	7,0
	2,3	2,3	2,5	2,8	3,1	3,3	3,3	3,3	3,1	2,8	2,6	2,4	2,8
Ровенская	-5,4	-4,4	0,0	6,9	13,5	16,9	18,5	17,5	13,0	7,4	1,8	-2,6	6,9
	2,3	2,4	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,8
Сумская	-7,9	-7,6	-2,4	6,4	14,0	17,6	19,3	18,4	12,9	6,4	-0,2	-5,4	6,0
	2,2	2,2	2,4	2,8	3,1	3,2	3,3	3,3	3,0	2,8	2,5	2,3	2,8
Тернопольская	-5,4	-4,4	0,1	7,0	13,5	16,6	18,4	17,4	13,0	7,4	1,8	-2,8	6,9
	2,3	2,4	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,8
Харьковская	-7,3	-6,9	-1,7	7,7	15,1	18,6	20,8	19,7	14,0	7,1	0,3	-4,8	6,9
	2,2	2,3	2,5	2,8	3,1	3,3	3,4	3,3	3,1	2,8	2,5	2,3	2,8
Херсонская	-3,2	-2,6	2,2	9,3	16,2	20,0	23,0	21,9	16,8	10,5	4,1	-0,8	9,8
	2,4	2,4	2,6	2,9	3,2	3,3	3,4	3,4	3,2	3,0	2,7	2,5	2,9
Хмельницкая	-5,6	-4,6	0,0	7,0	13,6	16,8	18,6	17,6	13,0	7,0	1,6	-3,0	6,8
	2,3	2,4	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,8
Черкасская	-5,8	-5,6	-0,4	7,6	14,9	17,8	20,0	19,3	14,0	7,2	1,4	-3,5	7,2
	2,3	2,3	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,3	3,1	2,8	2,6	2,4	2,8
Черновицкая	-5,0	-3,5	1,5	8,3	14,3	17,4	19,3	18,6	14,2	8,6	2,4	-2,4	7,8
	2,3	2,4	2,6	2,9	3,1	3,2	3,3	3,3	3,1	2,9	2,6	2,4	2,8
Черниговская	-6,7	-6,2	-1,4	6,8	14,4	17,5	19,4	18,2	13,2	6,8	0,6	-4,2	6,5
	2,3	2,3	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,3	3,1	2,8	2,6	2,4	2,8

Примечание. Среднемесячная температура, °С; COP – выделенные значения.

Этой установкой за год было потреблено природного газа 197,7 тыс. м³ и произведено 3150,1 тыс. кВт·ч (2709 Гкал) тепловой энергии. При этом удельный расход природного газа составил 73 м³/Гкал. Можно принять, что средний КПД водогрейных котлов, установленных в котельных населенных пунктов Украины, составляет 87 %, удельный расход природного газа — 140 м³/Гкал. Таким образом, при среднегодовом значении COP = 2,8, характерном для Киевской обл. в рассматриваемой теплонасосно-когенерационной установке, затраты природного газа на производство тепловой энергии для ГВС в 1,9 раза меньше, чем в водогрейном котле.

Среднегодовые значения COP для областей Украины изменяются в относительно узком диапазоне 2,8–2,9, что позволяет сделать вывод об энергетической эффективности применения воздушных теплонасосно-когенерационных установок в климатических условиях Украины (табл.2). Наиболее эффективным является применение этих установок в АР Крым, Днепропетровской, Запорожской, Луганской, Николаевской, Одесской и Херсонской областях, для которых среднегодовое значение COP составляет 2,9.

Показатели технико-экономической эффективности источника тепловой энергии в составе воздушного теплового насоса и когенерационной установки суммарной среднегодовой мощностью 374 кВт приведены ниже:

КПД водогрейного котла	– 0,87
Калорийность природного газа, ккал/нм ³	– 8200
Электрический КПД КГУ	– 0,40
Тепловой КПД КГУ	– 0,50
Годовой расход природного газа в котле, м ³	– 363467,08
Годовой расход природного газа в КГУ, м ³	– 197703,79
Годовая экономия природного газа, м ³	– 165763,29
Цена природного газа, грн/1000 м ³	– 2600,00
Годовая экономия, тыс. грн	– 430,98
Удельные капитальные затраты на ТН, евро/кВт _т	– 300,00
Удельные капитальные затраты на КГУ, евро/кВт _э	– 300,00
Удельные капитальные затраты на бак-аккумулятор, евро/л	– 0,20
Курс евро, грн/евро	– 11,00
Коэффициент дополнительного оборудования	– 1,10
Стоимость ТН, евро	– 77103,60
Стоимость КГУ, евро	– 28051,82
Стоимость бака-аккумулятора, евро	– 12660,03
Стоимость оборудования, тыс. грн	– 1425,57
Коэффициент проектных работ	– 0,05
Коэффициент монтажных работ	– 0,30
Всего капитальных затрат, тыс. грн	– 1924,52
Срок окупаемости капитальных затрат, лет	– 4,47

Проведенные расчеты показывают, что капитальные затраты на внедрение рассматриваемого

теплового источника установленной мощностью 408 кВт составляют около 1,9 млн грн. При этом удельные капитальные затраты составляют около 430 евро/кВт. Простой срок окупаемости капитальных затрат — 4,5 года.

Внедрение рассматриваемой теплонасосно-когенерационной установки позволяет сэкономить 166 тыс. м³ природного газа в год, что за десятилетний период позволяет снизить выбросы CO₂ на 3282 т и привлечь «зеленые инвестиции» на сумму 394 тыс. грн (при цене 15 долл./т CO₂). С учетом привлечения этих инвестиций срок окупаемости капитальных затрат может быть сокращен до 3,6 лет.

Если проект по внедрению рассматриваемой теплонасосно-когенерационной установки финансируется за счет привлечения заемных средств с кредитной ставкой 12 %, то дисконтированный срок окупаемости капитальных затрат составит 6,7 года. При длительности проекта 10 лет внутренняя норма рентабельности составит IRR = 21,3 %, а чистый денежный поток NPV = 381 тыс. грн.

Выводы

Показана технико-экономическая целесообразность использования комбинированных тепловых источников в составе тепловых насосов типа «воздух — вода» с приводом от газопоршневых когенерационных установок и баков-аккумуляторов в системах горячего водоснабжения. Удельный расход природного газа в этих тепловых источниках составляет 73 м³/Гкал, а в традиционных водогрейных котлах с КПД 87 % — 140 м³/Гкал, то есть в 1,9 раза больше. Простой срок окупаемости капитальных затрат проектов по установке теплонасосно-когенерационных тепловых источников составляет 4,5 года, а при использовании «зеленых инвестиций» — 3,6 года. При использовании заемных средств с кредитной ставкой 12 % дисконтированный срок окупаемости капитальных затрат составляет 6,7 года. Удельные капитальные затраты на установку этих тепловых источников составляют около 430 евро/кВт.

Комбинированные теплонасосно-когенерационные установки могут быть использованы при новом строительстве и при реконструкции действующих объектов. Целесообразно внедрение этих тепловых источников при модернизации существующих отопительных газовых котельных с нагрузкой на горячее водоснабжение. Существующие отопительные котлы могут быть использованы для подогрева горячей воды при пониженных температурах наружного воздуха.

Рассматриваемые теплонасосно-когенерационные установки могут быть использованы во всех

регионах Украины. Наиболее эффективно их применение в регионах Украины с высокими среднегодовыми температурами наружного воздуха.

Список литературы

1. 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.
2. Мхиторян Н.М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве / Под ред. И.Н.Карпа. — Киев : Наук. думка, 2000. — 412 с.
3. Хайнрих Г., Найрок Х., Нестлер В. Тепловые установки для отопления и горячего водоснабжения. — М. : Стройиздат, 1985. — 351 с.
4. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Отопление, водопровод, канализация. Ч. 1 / Под ред. И.Г.Старовойта. — М. : Госстройиздат, 1964. — 450 с.

Поступила в редакцию 14.02.11

Technical and Economic Efficiency of Air Thermal Pumps with Drive from Gas and Piston Cogeneration Installations of Hot Water Supply Systems

Nikitin E.E.

The Gas Institute of NASU, Kiev

The comparative analysis of technical and economic efficiency of combined heat sources integrated with heat pumps of «air — water» type with a drive from gas-piston cogeneration units and conventional gas hot-water boilers of hot water supply systems is carried out.

Key words: heat pump, gas-piston cogeneration installation, natural gas saving.

Received February 14, 2011

УДК 620.98

Оптимизация систем локальной электроэнергетики по критериям энергоэффективности и надежности

Григорьев Р.В.

Институт общей энергетики НАН Украины, Киев

Представлена методика определения оптимальной структуры генерирующих мощностей локальных систем электрообеспечения по критерию минимума цены электрической энергии с учетом фактора надежности. Приведен пример оптимизации типичной системы автономного электроснабжения бытовых потребителей с ненадежным питанием от централизованной сети.

Ключевые слова: локальная энергетика, надежность электрообеспечения, энергоэффективность.

Наведено методику визначення оптимальної структури генеруючих потужностей локальних систем електрозабезпечення за критерієм мінімуму ціни електричної енергії з урахуванням фактора надійності. Наведено приклад оптимізації типової системи автономного електропостачання побутових споживачів з ненадійним живленням від централізованої мережі.

Ключові слова: локальна енергетика, надійність електрозабезпечення, енергоефективність.