

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С СОЛНЕЧНЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ

***А. Т. Беленов, В. В. Чемяков, кандидаты технических наук
В. В. Харченко, доктор технических наук
ФБГНУ «Всероссийский институт электрификации
сельского хозяйства», г. Москва, Россия
e-mail: kharval@mail.ru***

Аннотация. При совместном использовании тепловых насосов и солнечных коллекторов (СК) можно повысить общую эффективность систем теплоснабжения. Методом динамического моделирования на основе уравнений баланса потребления тепловой и электрической энергии и энергии, получаемой от возобновляемых источников, определены оптимальные параметры системы. Критерии оптимизации – максимум выработки тепловой энергии, получаемой от СК, и минимум электропотребления тепловым насосом. Приведены рекомендации по проектированию систем автономного теплоснабжения на основе оборудования возобновляемой энергетики.

Ключевые слова: *тепловой насос, солнечный коллектор, система автономного теплоснабжения*

Анализ возможных областей использования в Российской Федерации теплонасосных систем, использующих нетрадиционные источники энергии, в частности, теплоту природной среды, показывает, что сегодня одной из наиболее перспективных областей их применения являются системы теплоснабжения зданий. Эффективным направлением внедрения теплонасосных технологий в практику представляется использование систем на основе такого доступного повсеместно источника тепловой энергии, как низкопотенциальная теплота приповерхностного грунта [1,2]. Такие системы нашли широкое применение в ряде стран Европы, США, Канады. Широкое распространение получили также системы теплоснабжения на основе теплоты поверхностных и сточных вод [3] и открытых водотоков [4].

Большой интерес представляют работы по использованию воздушных тепловых насосов (ТН) в различных климатических условиях России [5]. Перспективным представляется применение теплонасосных систем и при решении задачи теплоснабжения объектов малоэтажной застройки, которые обычно рассредоточены территориально и не могут быть объединены единой централизованной теплосетью [6]. Особенно перспективным для теплоснабжения малоэтажных зданий и удаленных

от централизованного энергоснабжения объектов представляется применение теплонасосных систем с использованием возобновляемых источников энергии как для обеспечения низкопотенциальной тепловой энергии, так и для электроснабжения компрессионных насосов.

Ранее авторы рассмотрели эффективность использования ТН «воздух-вода» в климатических условиях Черноморского побережья Краснодарского края при условии их электроснабжения от ветроэлектрических установок [7]. В настоящей работе рассмотрена система теплоснабжения с ТН, дополненная СК и аккумулирующими емкостями с теплоэлектронагревателями (рис. 1), определены их оптимальные параметры и общая эффективность системы.

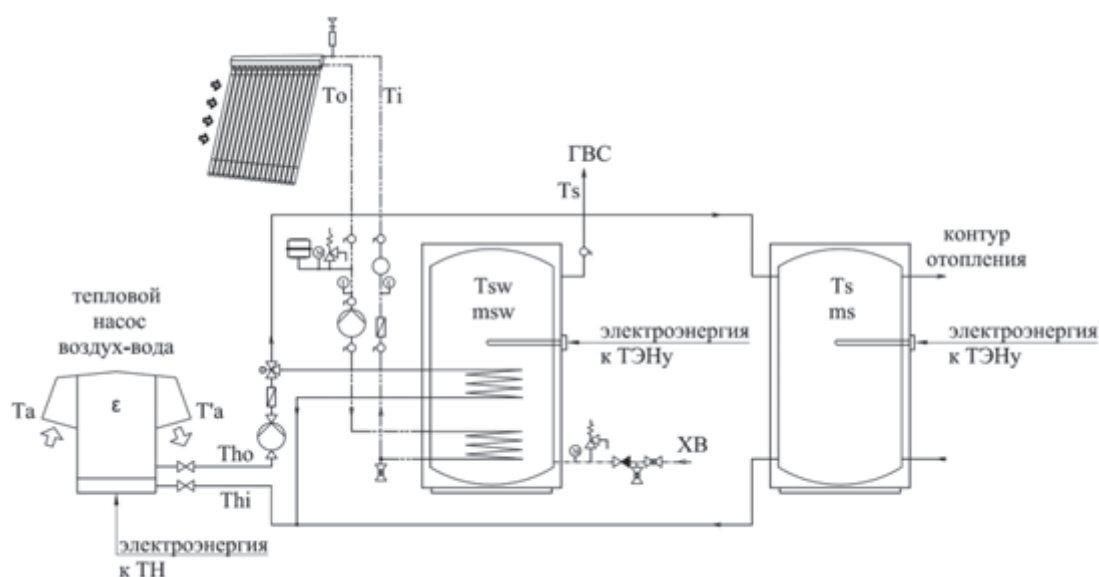


Рис. 1. Теплотехническая схема системы теплоснабжения

Цель исследований – оптимизация параметров теплонасосной системы автономного теплоснабжения с солнечными коллекторами.

Материалы и методы исследований. Технические характеристики используемых в исследовании СК представлены в документации по проектированию [8, 9]. Вакуумированные трубчатые солнечные коллекторы, несмотря на более высокую стоимость по сравнению с плоскими коллекторами, обладают лучшими характеристиками, показывают более высокую эффективность при круглогодичном использовании [10] и, вследствие этого, достаточно часто используются на практике. Технические преимущества таких коллекторов обеспечиваются, в первую очередь, особенностями конструкции тепловой трубки, благодаря которым коллектор способен собирать даже слабое рассеянное солнечное излучение, а вакуум между трубкой и поглотителем обеспечивает хорошую теплоизоляцию, практически полностью исключая потери на конвекцию, особенно при низких температурах окружающего воздуха.

Требуемая площадь поглощающей поверхности достигается соединением нескольких модулей СК в группу по параллельной схеме,

благодаря чему обеспечивается максимальный расход теплоносителя, около 60...80 л/ч на 1 м² площади СК. Это дает меньший разброс температур для подающей и обратной магистрали контура СК, и позволяет снизить потери тепла в окружающую среду.

Выполнение точного теплового расчета солнечной системы теплоснабжения практически представляет большие трудности из-за необходимости учета влияния случайных колебаний климатических параметров и сложного характера взаимодействия между элементами системы. Поэтому обычно используются упрощенные методы, которые основаны на обобщении результатов подробного моделирования гелиосистем и дают возможность получить долгосрочные характеристики исследуемой системы. Для наглядности описания процессов можно изобразить теплотехническую схему, представленную на рис. 1, в виде структурной модели, показанной на рис. 2. Более подробно построение математической модели системы теплоснабжения изложено в публикации [11]. Здесь мы отметим лишь основные моменты, характеризующие работу СК совместно с баком-аккумулятором.

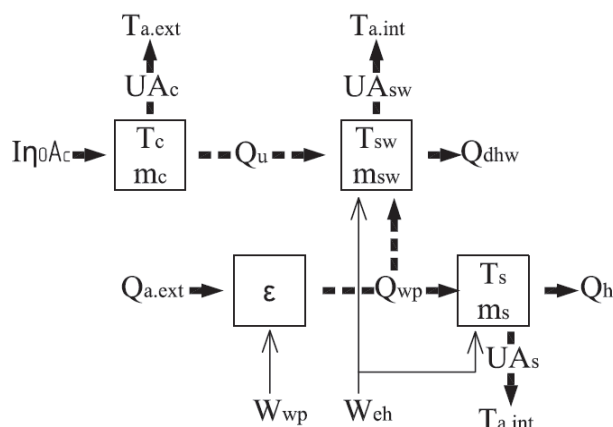


Рис. 2. Структурная схема системы теплоснабжения

Как известно, в стационарном режиме полезная тепловая энергия Q_u , вырабатываемая коллектором площадью A_c , определяется разностью между энергией поглощенного солнечного излучения и тепловыми потерями в окружающую среду [12, 13]. СК вырабатывает максимальное количество полезной энергии, когда температура всего коллектора T_c , равна температуре воды на его входе, при этом потери тепла в окружающую среду минимальны. Если массовый расход m_c , через коллектор увеличивается, разница температур на входе и выходе коллектора уменьшается. Это вызывает снижение потерь, так как снижается средняя температура абсорбера и, соответственно, увеличивается прирост полезной энергии.

Основным параметром для аккумулирующей емкости является теплосодержание единицы объема. Тепловая емкость Q_{sw} водяного аккумулятора, с однородной температурой аккумулирующей среды T_{sw} и конечной разницей температур, определяется массой теплоносителя в баке, и его удельной теплоемкостью $(mC_p)_{sw}$. Годовое теплопотребление

в системе ГВС составляет $Q_{dhw} = 4261$ кВт·ч [7] и является функцией величины расхода горячей воды за расчетный единичный интервал времени при заданных температурах холодной $+15$ °С, горячей расходной воды $+45$ °С, и при принятой температуре воды в баке-аккумуляторе $+60$ °С.

Интегрируя уравнение теплового баланса в баке-аккумуляторе с однородной температурой во всем объеме, во времени, можно моделировать долгосрочную работу аккумулирующей емкости. Используя способ Эйлера, получим уравнение для конечного интервала времени и решим его для температуры воды в баке в конце каждого часового интервала в течение года. Таким образом, определим температуру в конце каждого условного интервала времени T'_{sw} , при условии, что температура была неизменна в течение этого интервала.

Результаты исследований. Исходными данными для моделирования, как и в работе [7] приняты среднечасовые значения суммарной солнечной радиации, поступающей на поверхность коллектора, определенные по результатам мониторинга метеопараметров. В результате моделирования работы солнечного коллектора *Vitosol 200-T* [9] получены величины его удельной среднечасовой теплопроизводительности, по которым построен годово́й график (рис. 3).

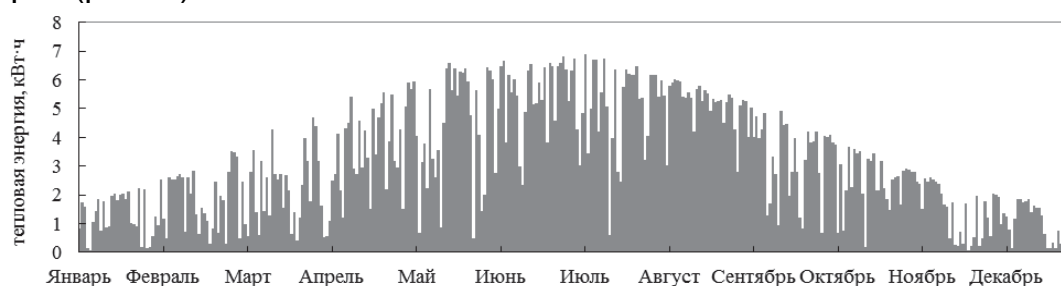


Рис. 3. График теплопроизводительности вакуумированного СК $S=1\text{м}^2$

Исходя из удельной теплопроизводительности СК ($Q_u=1153$ кВт·ч) и величины нагрузки ГВС Q_{dhw} , площадь СК должна составлять не менее 4 м^2 . Однако из-за неравномерности прихода солнечной радиации фактически СК будет покрывать около 70% нагрузки ГВС, остальная часть должна быть выработана дополнительным электронагревателем. Составляющие тепловой энергии в нагрузке ГВС, получаемой от СК и ТЭН, определены в результате динамического моделирования с варьируемыми параметрами площади СК и емкости бака-аккумулятора (рис. 4). Использование тепла от дополнительного источника можно сократить путем увеличения площади солнечных коллекторов или увеличением объема бака-аккумулятора.

В первом случае, увеличение площади СК с 4 м^2 до 12 м^2 повысит долю солнечной энергии в нагрузке ГВС с 62 % до 77 %. Во втором случае, увеличение объема бака с 300 л до 750 л повысит долю солнечной энергии примерно на такую же величину с 62 % до 75%.

Однако, в первом случае, эффективность использования СК сократится с 65% до 28 %, т. е. большая часть потенциальной тепловой энергии не будет использована, тогда как во втором случае эффективность увеличится до 80%. Кроме того, с увеличением площади СК и емкости бака средняя температура в его объеме становится выше и это приводит к небольшому увеличению потерь тепла из бака-аккумулятора.

		Площадь солнечных коллекторов, м ²					
		4	6	8	10	12	14
Объем бака-аккумулятора, л	300л	$\varepsilon = 71,23\%$ 3284,79 1550,83 -577,65	$\varepsilon = 53,84\%$ 3724,22 1142,30 -609,00	$\varepsilon = 42,96\%$ 3962,06 933,35 -637,40	$\varepsilon = 36,09\%$ 4160,20 756,68 -658,79	$\varepsilon = 31,24\%$ 4321,25 616,69 -679,96	$\varepsilon = 27,49\%$ 4437,13 527,53 -706,41
	500л	$\varepsilon = 82,32\%$ 3795,97 1284,14 -825,82	$\varepsilon = 62,30\%$ 4309,46 826,32 -881,48	$\varepsilon = 49,59\%$ 4573,94 595,73 -914,94	$\varepsilon = 41,31\%$ 4762,67 440,62 -948,32	$\varepsilon = 35,30\%$ 4883,47 343,86 -972,41	$\varepsilon = 30,93\%$ 4991,29 261,95 -998,10
	750л	$\varepsilon = 88,25\%$ 4069,76 993,87 -812,88	$\varepsilon = 67,22\%$ 4649,79 482,24 -881,44	$\varepsilon = 52,78\%$ 4867,48 300,82 -917,50	$\varepsilon = 43,27\%$ 4988,09 208,63 -945,37	$\varepsilon = 36,85\%$ 5060,37 154,02 -962,98	$\varepsilon = 31,75\%$ 5124,48 113,55 -986,84
где		ε - эффективность использования СК, %; □ $Q_{u'}$ - полезная энергия от СК, кВт·ч; ■ Q_d - энергия от ТЭН, кВт·ч; □ ΔQ_{uas} - потери тепла в баке-аккумуляторе, кВт·ч.					

Рис. 4. Результаты моделирования эффективности использования СК

Таким образом, очевидно, что для полного покрытия нагрузки ГВС за счет энергии, вырабатываемой СК с оптимальной эффективностью, необходимо использовать коллекторы площадью не менее 6 м² с баком аккумулятором 500 л. Для системы с такими параметрами на рис. 5 представлен смоделированный график температуры воды в баке-водонагревателе ГВС. Как видно, температура расходной горячей воды в системе ГВС поддерживается на отметке не ниже +45°С большую часть времени, без подогрева от теплогенератора, который включается только в периоды низкой инсоляции, когда температура понижается ниже установленного порога.

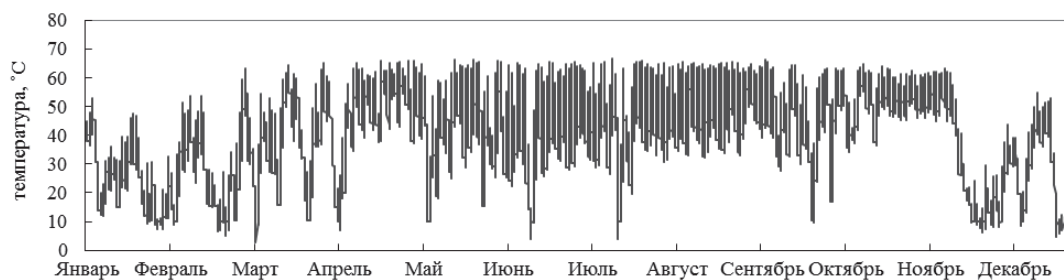


Рис. 5. Температура в баке-водонагревателе ГВС при работе только от СК

Для определения оптимальной площади СК, работающего в составе системы теплоснабжения с ТН, используются результаты, полученные ранее [7] для ТН марки AW110 мощностью 9,3 кВт. Система теплоснабжения моделируется таким образом, что ТН является основным теплогенератором для покрытия нагрузки отопления и резервным для ГВС, а СК преимущественно обеспечивает нагрузку ГВС. ТЭНы в баках-аккумуляторах используются как пиковые в случае недостаточной теплопроизводительности ТН и СК. На рис. 6 приведен пример результатов моделирования в виде среднечасовых величин вырабатываемой тепловой энергии от ТН, СК площадью 6 м² с аккумулятором емкостью 500 л и ТЭН. Аналогично путем подбора площади СК можно получить величины годовой теплопроизводительности для всех компонентов системы, а также эффективность использования СК и экономию электроэнергии на привод ТН и питание ТЭН.

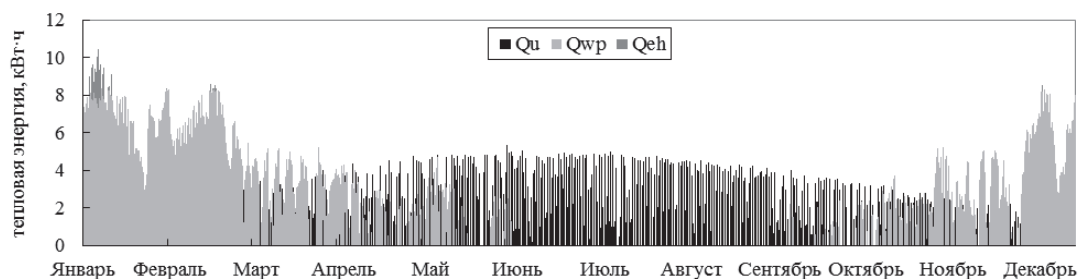


Рис. 6. Годовой график теплопроизводительности теплового насоса (Q_{wp}), солнечных коллекторов (Q_u) и электронагревателя (Q_{eh})

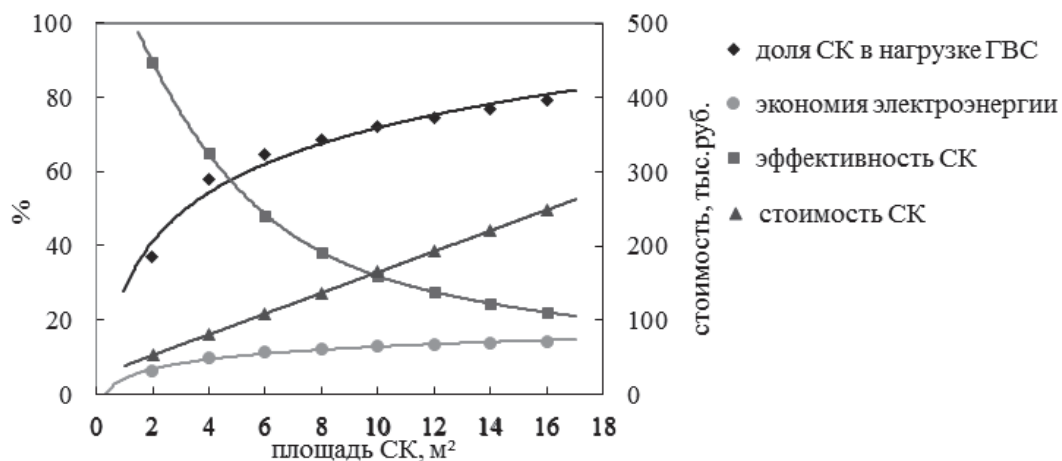
Результаты моделирования системы теплоснабжения с ТН и СК различной площади представлены в таблице.

Показателем эффективности использования СК является отношение величин теплопотребления на ГВС и полезной теплопроизводительности СК, а сравнительным показателем эффективности систем с СК различной площади является величина экономии электроэнергии. На рис. 7 представлены обобщенные результаты в виде зависимости, которые показывают, как с увеличением площади СК изменяется доля его теплопроизводительности в покрытии тепловой нагрузки ГВС, а также эффективность СК и общее электропотребление в системе с ТН и ТЭН. Также на графике представлена зависимость стоимости СК от площади.

Результаты моделирования системы теплоснабжения с ТН и СК различной площади

Площадь солнечных коллекторов, м ²	4	6	8
Теплопотребление дома на отопление, кВт·ч		13 620	
Тепловая энергия от ТН AW110 на отопление, кВт·ч	15 024	14 645	14 428
Потери тепла из бака отопительной воды, кВт·ч	403	403	403
Тепловая энергия от электронагревателя, кВт·ч	175	160	146
Электропотребление теплового насоса, кВт·ч	5 150	5 047	4 990
Средний коэффициент преобразования	2,92	2,90	2,89
Теплопотребление на ГВС, кВт·ч		4 261	
Тепловая энергия от СК, кВт·ч	3 453	3 902	4 168
Потери тепла из бака-водонагревателя, кВт·ч	770	826	862
Тепловая энергия от теплового насоса на ГВС, кВт·ч	1 578	1 184	954
Эффективность использования СК, %	75	56	45
Общее потребление электроэнергии, кВт·ч	5 324	5 207	5 137

Критерием оптимизации выбрана функция обеспечения максимума тепловой энергии, получаемой от СК, и минимума затрат электрической энергии для питания ТН и ТЭН системы теплоснабжения. Результаты моделирования показывают, что увеличение площади используемых солнечных коллекторов более 6 м² нецелесообразно, поскольку относительная величина их теплопроизводительности в нагрузке ГВС увеличивается не более чем на 4 % на каждые 2 м² площади. Та же зависимость характерна для показателя экономии электроэнергии, величина которого составляет 12 % при площади 6 м².



**Рис. 7. Соотношение параметров системы
в зависимости от площади СК**

Также более чем на 50 % снижается и эффективность использования СК, при том, что стоимость СК растет практически линейно, что вызывает значительное удорожание всей системы теплоснабжения без получения какого-либо видимого эффекта. Окончательный выбор того или иного варианта конфигурации системы

автономного теплоснабжения рекомендуется проанализировать с точки зрения технико-экономических показателей, в частности по величине наименьших совокупных инвестиционных, эксплуатационных и энергетических затрат.

Выводы

Вышеприведенные данные показывают, что применение моделирования при проектировании систем теплоснабжения для любого конкретного потребителя позволяет оптимизировать выбор ее конфигурации и состава оборудования, что обеспечивает повышение технико-экономических характеристик системы.

Список литературы

1. Васильев Г. П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных системах / Г. П. Васильев, Н. В. Шилкин // АВОК. – 2003. – № 2. – С. 52–62.
2. Калинин М. И. Эффективное использование приповерхностных геотермальных ресурсов в геолого-климатических условиях центральных регионов России / М. И. Калинин, Б. Н. Хахаев, Е. П. Кудрявцев // Вестник Ярославского регионального отделения РАЕН. – 2007. – Т. 1, № 1. – С. 20–26.
3. Kavanaugh, M. C. Pezent. Water-to-air heat pump performance with lakewater // Proceedings of the sixth symposium on improving building systems in hot and humid climates (Dallas, TX, October 3–4, 1989).
4. Case Study – Restoration of an Old Watermill [Электронный ресурс]. URL: <http://www.theconstructioncentre.co.uk/companies/kensa-heat-umps/11582>.
5. Филиппов С. П. Перспективы применения воздушных тепловых насосов для теплоснабжения жилых зданий в различных климатических условиях / С. П. Филиппов, М. С. Ионов, М. Д. Дильман // Теплоэнергетика. – 2012. – № 11. – С. 11.
6. Филиппов С.П. Эффективность использования тепловых насосов для теплоснабжения малоэтажной застройки / С. П. Филиппов, М. С. Ионов, М. Д. Дильман // Теплоэнергетика. – 2011. – № 11. – С. 12–19.
7. Чемяков В. В. Система теплоснабжения автономного жилого дома на основе теплового насоса и ветроэлектрической установки / В. В. Чемяков, В. В. Харченко // Теплоэнергетика. – 2013. – № 3. – С. 58–62.
8. Гелиотехника Logasol для горячего водоснабжения и поддержки отопления. Документация для планирования и проектирования // Будерус отопительная техника, 2005. – 118 с.
9. Солнечные коллекторы Vitosol. Инструкция по проектированию // Viessmann Werke GmbH&Co, 2003. – 88 с.
10. Сравнительная эффективность использования солнечных водонагревателей различных типов в климатических условиях Российской Федерации / О. С. Попель, С. Е. Фрид, Ю. Г. Коломиец, Е. В. Сушникова // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 12. – С. 33–38.
11. Чемяков В. В. Построение математической модели системы автономного теплоснабжения на базе теплового насоса / В. В. Чемяков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2012. – № 2-2 (147). – С.167–172.

12. Харченко Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
13. Solar engineering of thermal processes / John A. Duffie, William A. Beckman. – 2nd ed. Wiley, John & Sons, Incorporated, 1991. – 918 p.
14. Чемяков В. В. Оценка эффективности применения тепловых насосов типа «воздух-вода» для теплоснабжения индивидуальных жилых домов в климатических условиях Краснодарского края / В. В. Чемяков // Труды 7-й Международной научно-технической конференции (18–19 мая 2010 г., Москва, ГНУ ВИЭСХ). Часть 4. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – С. 293–298.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ІЗ СОНЯЧНИМИ КОЛЕКТОРАМИ

О. Т. Бєлєнов, В. В. Чемяков, В. В. Харченко

Анотація. При спільному використанні теплових насосів і сонячних колекторів (СК) можна підвищити загальну ефективність систем теплопостачання. Методом динамічного моделювання на основі рівнянь балансу споживання теплової і електричної енергії та енергії, одержуваної від поновлюваних джерел, визначені оптимальні параметри системи. Критерії оптимізації – максимум вироблення теплової енергії, одержуваної від СК, і мінімум електроспоживання тепловим насосом. Наведено рекомендації з проектування систем автономного теплопостачання на основі обладнання відновлюваної енергетики.

Ключові слова: тепловий насос, сонячний колектор, система автономного теплопостачання

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE HEAT PUMP SYSTEM INDEPENDENT HEAT SUPPLY WITH SOLAR COLLECTORS

A. Belenov, V. Chemekov, V. Kharchenko

Annotation. When sharing thermal pumps and solar collectors (SC) it is possible to increase overall effectiveness of systems of heat supply. The method of dynamic modeling on the basis of the equations of balance of consumption of the thermal and electric energy and energy received from renewable sources has determined optimum parameters of system. Criteria of optimization - a maximum of the heat energy produced by SC and a minimum the heat pump power consumption. Recommendations for design of systems of autonomous heat supply on the basis of the equipment of renewable energy are provided.

Key words: heat pump, solar collector, system of autonomous heat supply