

Повышение эффективности геотермальных теплонасосных систем в холодных регионах путем комбинированного использования двух источников тепла: земли и окружающего воздуха

Г. П. Васильев, доктор технических наук, почетный строитель России, научный руководитель ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»

А. Н. Дмитриев, доктор технических наук, профессор кафедры экономики и управления городским строительством инженерно-экономического факультета Российской экономической академии им. Плеханова

В. Ф. Горнов, директор проектного отделения ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»

В. А. Юрченко, научный сотрудник ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»

В статье рассматривается задача повышения эффективности эксплуатации теплонасосных систем в регионах с низкими температурами наружного воздуха за счет комбинированного использования теплоты грунта и атмосферного воздуха. В этом варианте уменьшается тепловая нагрузка на грунтовой массив, что позволяет уменьшить размеры грунтового теплообменника и сохранить более высокую температуру грунта в течение отопительного сезона. Как следствие, удается получить более высокое значение коэффициента трансформации и сэкономить порядка 13% электрической энергии на привод тепловых насосов. В соответствии с выполненными расчетами создан экспериментальный образец комбинированной системы для коттеджа в Московской области.

Ключевые слова

Геотермальная теплонасосная система, воздушный тепловой насос, термоскважина, теплоснабжение, энергосбережение.

Введение

Теплонасосные системы получают все большее распространение во всем мире, в том числе и в регионах с холодным климатом [1, 2, 3]. Наиболее широко применяются два вида таких систем — воздушная теплонасосная система (ВТС) и геотермальная теплонасосная система (ГТС). Обе системы имеют свои достоинства и недостатки. Так, ГТС обеспечивают стабильное и надежное теплоснабжение, но при этом имеют высокую первоначальную стоимость. В свою очередь эффективность и производительность ВТС сильно зависят от постоянно меняющихся условий окружающей среды.

Работа в регионах с холодным климатом предъявляет дополнительные требования к теплонасосным системам. Отопительный период на большей части территории России заметно длиннее, а температуры окружающего воздуха намного ниже, чем, например, в Европе, что приводит к значительному снижению температур грунта в процессе эксплуатации ГТС, что, в свою очередь, приводит к снижению их эффективности. Согласно [4], тепловой дисбаланс грунта является ключевой проблемой, препятствующей эффективному функционированию ГТС в холодном регионе).

Бороться с этим эффектом можно несколькими способами: увеличение скважины [5, 6], модификация конструкции скважины [7], улучшение тепловых свойств [8, 9, 10], но самым действенным способом остается увеличение протяженности или количества грунтовых теплообменников [11]. Этот способ, однако, существенно увеличивает и стоимость системы, которая и без того достаточно высока по сравнению с ВТС.

В свою очередь теплопроизводительность ВТС значительно снижается при температурах окружающего воздуха ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]. Также при низких температурах наружного воздуха низкой оказывается и их эффективность: согласно исследованиям [13], COP воздушной ВТС составляла 1,8 и 1,1, что соответствовало наружной температуре $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно. Чтобы компенсировать снижение производительности ВТС при температурах ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, иногда предлагаются негабаритные единицы для удовлетворения высоких потребностей в теплоснабжении в экстремально холодные дни [14]. Но при этом увеличивается их стоимость: если обычно ВТС оказываются заметно дешевле, чем ГТС, поскольку не требуют обустройства грунтовых теплообменников, то в случае переразмеренной установки это преимущество сокращается [15].

Для того чтобы избежать удорожания, в обоих вариантах системы при обеспечении надежного теплоснабжения в регионах с холодным климатом предлагается комбинированная система, использующая и тепло грунта, и тепло атмосферного воздуха.

Методы

Для оценки эффективности такого решения были проведены сравнительные исследования работы теплонасосной системы, использующей только теплоту грунтового массива, и системы с комбинированным использованием теплоты и грунтового массива, и атмосферного воздуха при температуре выше минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом в случае комбинированной системы грунтовый массив используется незначительную часть отопительного сезона: только при температурах атмосферного воздуха ниже минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данная температура была выбрана в качестве граничной в соответствии с результатами исследований Шведского энергетического агентства, согласно которым именно при такой

температуре ВТС еще обеспечивает полное покрытие отопительных нагрузок (потребность в отоплении). При более низких температурах наружного воздуха снижающаяся теплопроизводительность теплового насоса уже оказывалась меньше, чем требуемая нагрузка отопления, которая с понижением наружной температуры, напротив, возрастает.

На рис. 1 показана продолжительность стояния температур в Москве за отопительный период 2015–2016 годов в соответствии с данными метеостанции WMO ID 27612.

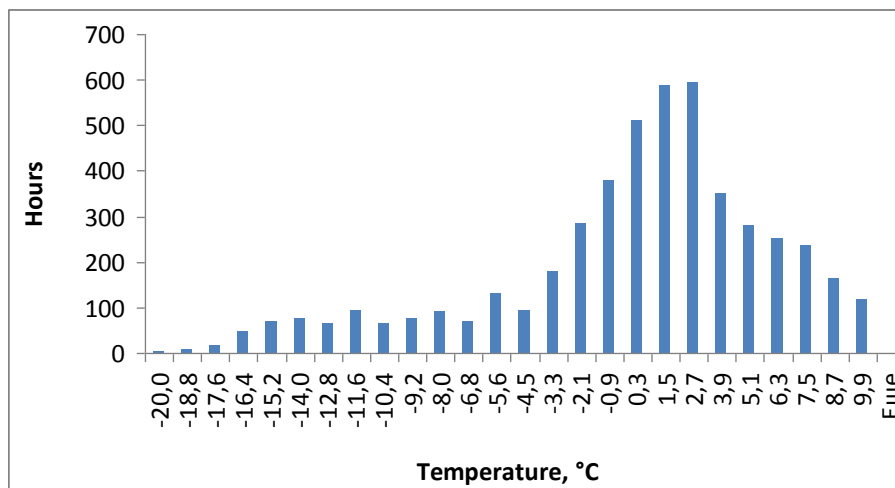


Рис. 1. Гистограмма температур отопительного сезона 2015/16 в Москве

Как видно из рисунка, время стояния температур окружающего воздуха ниже минус 10 °С составляют всего 10–12% от длительности отопительного сезона. В это время комбинированная теплонасосная система теплоснабжения (КТСТ) работает от грунта. В остальной период в качестве источника низкопотенциальной теплоты система использует атмосферный воздух.

Принципиальная схема рассматриваемой КТСТ, использующей в качестве источника тепла низкого потенциала комбинацию атмосферного воздуха и грунтового массива, приведена на рис. 2.

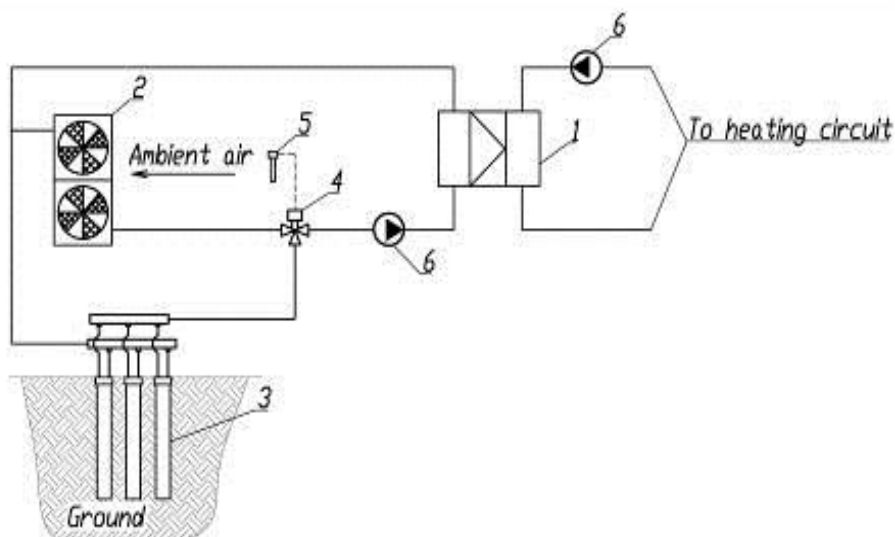


Рис. 2. Схема комбинированной теплонасосной системы теплоснабжения (КТСТ):

1 — тепловой насос; 2 — воздушный теплообменник; 3 — термоскважины; 4 — трехходовой клапан; 5 — датчик температуры атмосферного воздуха; 6 — циркуляционный насос

Система сбора низкопотенциальной теплоты состоит из параллельно подключенных к испарителю теплового насоса 1, воздушного теплообменника 2 и грунтового теплообменника 3. Электроуправляемый трехходовой клапан 4 по сигналу датчика температуры атмосферного воздуха 5 переключает поток теплоносителя либо на воздушный теплообменник 2, либо на грунтовой теплообменник 3.

Для оценки эффективности предложенных решений авторами были проведены численные исследования по оценке эффективности предлагаемого решения. Моделирование осуществлялось при помощи программы INSOLAR.GSHP.12. Это программное обеспечение основано на математической модели пространственного нестационарного теплового режима грунта вокруг термоскважины с учетом климатических условий строительной площадки, теплоизоляции здания, характеристик тепловых насосов, циркуляционных насосов, нагревательных устройств, а также их режимов работы [16].

При проведении исследований рассматривался гипотетический коттедж площадью 200 м^2 , для которого были выполнены численные эксперименты по моделированию эксплуатационных режимов КТСТ в почвенно-климатических условиях г. Москвы. Продолжительность отопительного сезона была принята равной 205 суткам в соответствии с действующими климатологическими нормами [17].

Основные исходные данные численного эксперимента представлены в Таблица .

Таблица 1. Основные исходные данные

Параметр	Размерность	Величина
Радиус термоскважин	м	0,080
Глубина термоскважин	м	50,00
Расход теплоносителя в системе теплосбора	м ³ /час	5,513
Температура наружного воздуха	°С	5,4
Эффективность теплозащиты здания в расчете на 1 термоскважину	Вт/°С	288,684
Мощность установленного электрооборудования	кВт	4,613
Кинематическая вязкость теплоносителя системы теплосбора	кв.м/с	1,789Е-06
Коэффициент теплопередачи от грунта к теплоносителю	Вт/(кв.м·°С)	86,000
Теплоемкость теплоносителя	Вт·час/(кг·°С)	1,047
Объемный вес теплоносителя	кг/куб.м	1 020,000
Теплопроводность грунта по горизонтали	Вт/(м·°С)	2,000
Теплопроводность грунта по вертикали	Вт/(м·°С)	2,000
Коэффициент теплопередачи с поверхности грунта	Вт/(кв.м·°С)	23,260
Теплоемкость грунта	Вт·час/(кг·°С)	0,642
Объемный вес грунта	кг/куб.м	2 000,000
Расчетная температура внутреннего воздуха в помещении (зима)	°С	20,00
Расчетная температура наружного воздуха	°С	минус 28,0
Продолжительность отопительного периода	мес.	7
Тип теплового насоса		грунт-вода
Установленная электрическая мощность привода теплового насоса	кВт	2,500
Температура конденсации	К	323
Термодинамический КПД теплового насоса	-	0,650
Температурный напор в конденсаторе	К	5
Температурный напор в испарителе	К	5
Температурный напор между внутренним воздухом и теплоносителем системы теплохладоснабжения	К	10
Установленная электрическая мощность циркуляционных насосов контура испарителя	кВт	0,100
КПД циркуляционных насосов контура испарителя	-	0,8
Установленная электрическая мощность циркуляционных насосов системы отопления	кВт	0,050
Потери напора в испарителе	м вод. столба	2

В качестве критерия эффективности работы теплонасосной системы были приняты коэффициент преобразования энергии и суммарные затраты электрической энергии за отопительный период.

Моделировалась работа системы при двух конфигурациях источника тепла:

- Грунт.
- Окружающий воздух и земля.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены полученные значения коэффициента преобразования для двух рассмотренных вариантов теплонасосной системы за отопительный период.

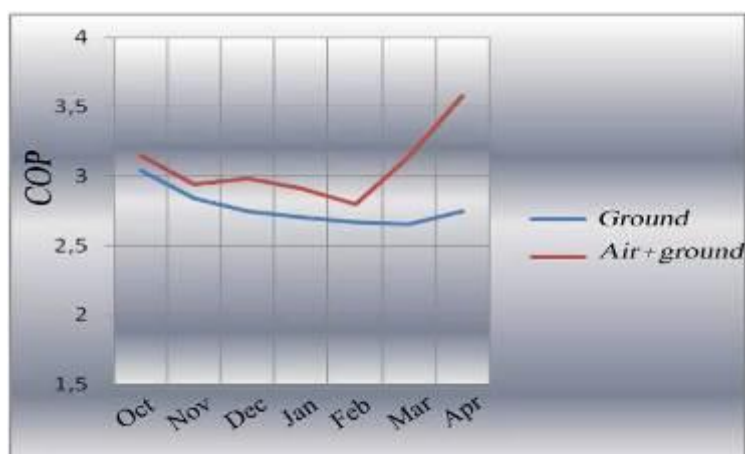


Рис. 3. Коэффициенты преобразования энергии

Как видно из графиков, коэффициент трансформации ГТС постепенно падает из-за выхолаживания грунтового массива и только к концу отопительного сезона несколько возрастает за счет снижения отопительной нагрузки. В случае КТСТ в течение всего отопительного периода коэффициент трансформации выше, в том числе за счет менее интенсивного выхолаживания грунтового массива, а к концу отопительного периода существенно возрастает за счет преимущественного использования теплоты уже достаточно прогретого атмосферного воздуха.

Потребление энергии системой определялось с учетом изменения температуры грунта при многолетнем извлечении тепла, при этом приток тепла из окружающего грунта, за счет которого происходит восстановление температуры в периоды низких или отсутствующих нагрузок на грунтовые теплообменники, также учитывался. Таким образом, потребление энергии системой вычислялось на 5-й год эксплуатации. Затраты энергии на дефростацию воздушного теплообменника не учитывались. Данные по потреблению электрической энергии в течение отопительного периода для рассмотренных вариантов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Потребление электрической энергии

	Ед. измер.	Кол-во
ГТС	кВт·ч	14 903
КТСТ	кВт·ч	12 917

Из представленных данных видно, что комбинированное использование низкопотенциальной теплоты грунтового массива и атмосферного воздуха позволяет снизить потребление энергии системой на 13,3% по сравнению с ГТС.

В соответствии с выполненными расчетами был создан экспериментальный образец комбинированной системы для коттеджа в ДПК «Алеко» в Московской области, приведенного на фотографии рис. 4.



Рис. 4. Фотография коттеджа, на котором был смонтирован экспериментальный образец комбинированной системы

Мнемосхема примененной комбинированной системы с дополнительной утилизацией теплоты вентиляционных выбросов приведена на рис. 5. Система находится в начальной стадии экспериментальной эксплуатации.

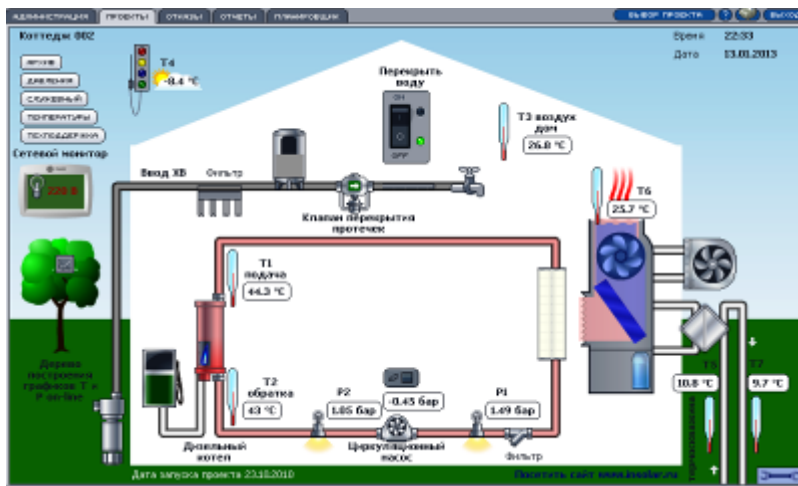


Рис. 5. Мнемосхема экспериментального образца комбинированной теплонасосной системы

Заключение

Результаты численного моделирования подтверждают эффективность предложенного решения с точки зрения обоих выбранных показателей эффективности — COP и суммарных затрат электрической энергии за отопительный период.

Коэффициент преобразования КТСТ оказывается выше аналогичного показателя для GHPS на протяжении всего отопительного периода.

Экономия энергии в случае комбинированного источника получена равной 13,3%.

В данной работе рассмотрено использование теплоты атмосферного воздуха при помощи системы с промежуточным теплоносителем, что является не самым эффективным решением из-за потерь температуры в промежуточных теплообменниках и дополнительных затрат энергии на привод циркуляционного насоса. Для повышения эффективности утилизации теплоты атмосферного воздуха целесообразно рассмотреть вариант КТСТ с применением теплообменника хладагент-воздух [18].

Применение комбинации источников тепла и соответственное снижение нагрузки на грунтовые теплообменники позволит сохранить более высокие температуры грунта и тем самым повысить эффективность работы теплового насоса. Вместе с тем использование атмосферного воздуха в начале и конце отопительного периода, когда температура атмосферного воздуха выше температуры грунта, также повышает эффективность работы теплонасосной системы.

В регионах с холодным климатом комбинированное использование грунта и воздуха в качестве источников тепла для теплонасосной системы за счет распределения нагрузки между двумя источниками позволяет избежать увеличения размеров грунтовых

теплообменников в варианте ГТС. Таким образом, капитальные затраты на создание комбинированной системы будут ниже, чем затраты на создание ГТС: ожидается, что относительно небольшой воздушный теплообменник, используемый в периоды с умеренными температурами наружного воздуха, будет дешевле, чем дополнительные грунтовые теплообменники.

В качестве одного из критериев оптимизации эффективности работы КТСТ может быть предложена температура переключения на грунтовые теплообменники. В настоящей работе эта температура принята равной минус 10 °С, но, поскольку существенное снижение характеристик ВТС наблюдается уже от 0 °С, именно эту температуру можно рассмотреть в качестве граничной. Как видно из рис. 1, даже в этом случае КТСТ будет использовать воздух на протяжении более чем половины отопительного периода.

Литература

-
1. Outlook 2011. European Heat Pump Statistics. The European Heat Pump Association.
 2. Васильев Г. П. Эффективность и перспективы использования тепловых насосов в городском хозяйстве Москвы. Энергосбережение. 2007. № 8. С. 63.
 3. Васильев Г. П. Основные задачи городской программы об энергосберегающем домостроении в Москве. Энергосбережение. 2009. № 4. С. 8–14.
 4. Tian You, Wei Wu, Wenxing Shi, Baolong Wang, Xianting Li. An overview of the problems and solutions of soil thermal imbalance of ground-coupled heat pumps in cold regions. Applied Energy 177 (2016) 515–536.
 5. Васильев Г. П., Шилкин Н. В. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных системах АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2003. № 2. С. 52–62.
 6. Gornov V. F., Peskov N. V., Vasilyev G. P., Kolesova M. V. Assessment of impact of borehole heat exchanger design on heat extraction/rejection efficiency, MATEC Web of Conferences 75. 2016.C. 09009.
 7. Васильев Г. П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии грунта поверхностных слоев земли для теплохладоснабжения здания. Теплоэнергетика. 1994. № 2. С. 31–33.

-
8. Chiasson AD, Rees SJ, Spitler JD. A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground source heat pump systems. Stillwater, (OK, US): Oklahoma State Univ; 2000.
 9. Vasilyev G. P., Peskov N. V., Lichman V. A., Gornov V. F., Kolesova M. V. Simulating the thermal operating conditions in the thermal wells of ground-source heat-pump heat supply systems. Part I: porous moisture freezing processes in soil. *Thermal Engineering*. 2015. Т. 62. № 8. С. 547–552.
 10. Vasilyev G. P., Peskov N. V., Lichman V. A., Gornov V. F., Kolesova M. V. Simulating the thermal operating conditions in the thermal wells of ground-source heat-pump heat supply systems. Part II: consideration of porous moisture phase transitions in soil. *Thermal Engineering*. 2015. Т. 62. № 10. С. 751–756.
 11. Васильев Г. П. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения. *Теплоэнергетика*. 2004. № 6. С. 33–41.
 12. S. Bertsch, E. Groll, Two-Stage Air-Source Heat Pump for Residential Heating and Cooling Applications in Northern U.S Climates. *International Journal of Refrigeration* 31 (2008) 1282.
 13. V.I. Ugursal, B. Ma, C. Li, Thermal Performance and Economic Feasibility of A Low Energy House Equipped with An Air-Source Heat Pump. *American Society of Mechanical Engineers* (1992) 111–117.
 14. N. J. Hewitt, M. J. Huang, M. Anderson, M. Quinn, Advanced air source heat pumps for UK and European domestic buildings, *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 3713–3719.
 15. Васильев Г. П. Зеленое строительство как инструмент экономии первичного топлива. *Энергосбережение*. 2011. № 8. С. 26–41.
 16. Gornov V. F., Peskov N. V., Vasilyev G. P., Kolesova M. V. Modelling of Thermal Behavior of Borehole Heat Exchangers of Geothermal Heat Pump Heating Systems. *MATEC Web of Conferences* 77, 06009. 2016.
 17. СП 131.13330.2012 «Строительная климатология». 2012.
 18. Г. П. Васильев, В. А. Личман, И. А. Юрченко, М. В. Колесова. «Метод оценки коэффициента теплотехнической однородности из анализа термограмм». *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 6 (66). С. 60–67.