

УДК 536.24

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СВАЙ С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ВОЗДУХ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ И ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Филатов С.О., Володин В.И., докт. техн. наук.

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13-А, 220006, Минск, Республика Беларусь

На основі чисельного моделювання розглянуто ефективність застосування енергетичних палів з теплоносієм повітря як складової систем припливної вентиляції та теплопостачання з тепловим насосом.

На основе численного моделирования рассмотрена эффективность применения энергетических свай с теплоносителем воздух в составе систем приточной вентиляции и теплоснабжения с тепловым насосом.

The efficiency of applying of energy piles with air as a heat transfer medium in the ventilation and heat pump heating systems were rewired on the basis of numerical simulation.

Библ. 7, рис. 3

Ключевые слова: системы приточной вентиляции, энергетические сваи, тепловой насос, воздушный грунтовой теплообменник, энергия грунта.

A, B – коэффициенты;

A_{air} – амплитуда колебаний температуры, °С;

a – температуропроводность, м²/с;

c – теплоемкость, Дж/(кг·°С);

F – поверхность теплообмена, м²;

G – массовый расход, кг/с;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С);

r – радиальная координата, м;

t – температура, °С;

Q – теплопроизводительность (тепловой поток), Вт;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

Δt – температурный напор, °С;

ε – коэффициент трансформации;

λ – теплопроводность, Вт/(м·°С);

τ – время, с;

ВГТО – вертикальный грунтовой теплообменник;

ГЖТ – газо-жидкостный теплообменник;

ТН – тепловой насос;

ЭС – энергетическая свая.

Индексы верхние:

' – на входе;

" – на выходе.

Индексы нижние:

0 – естественное состояние грунта;

air – относится к воздуху;

boг – относится к радиусу скважины;

eff – эффективный;

EP – теплоноситель энергетической сваи;

HE – относится к ГЖТ;

soil – грунт;

∞ – на удаленном расстоянии.

Введение

Одним из современных направлений развития энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии является совершенствование технологий использования энергетического потенциала верхних слоев грунта, то есть таких технологий, в которых грунт является приемником или источником теплоты, а также может служить тепловым аккумулятором [1]. В

этом случае перспективным является применение энергетических свай (ЭС), причем малоисследованным направлением является использование энергетических свай с теплоносителем воздух.

В настоящей работе возможность применения воздуха в качестве теплоносителя систем использования энергетического потенциала грунта анализируется для двух случаев. В первом – ис-

следует работа энергетической сваи с теплоносителем воздух как элемента приточной вентиляции. Во втором – проводится анализ совместной работы теплового насоса (ТН) и энергетической сваи с теплоносителем воздух.

Энергетическая свая в системе приточной вентиляции

В настоящее время имеется опыт использования в системах приточной вентиляции горизонтальных воздушных грунтовых теплообменников, которые представляют собой уложенные в грунт трубы, по которым прокачивается приточный воздух.

В теплый период года за счет того, что температура грунта меньше температуры приточного воздуха, происходит его охлаждение. В этом случае можно частично или полностью отказаться от использования получивших широкое распространение систем кондиционирования воздуха на основе парокомпрессионных холодильных машин, для которых характерно большое потребление электрической энергии. В холодный период года поступающий в воздушный грунтовый теплообменник приточный воздух подогревается за счет того, что грунтовой

массив имеет более высокую температуру. В этом случае предварительный подогрев приточного воздуха позволит снизить потребление теплоты от традиционных источников.

Существенным недостатком описанных горизонтальных грунтовых теплообменников является большая занимаемая площадь открытой территории, что определяет их рациональное применение лишь на объектах с такими участками.

Более выигрышными по занимаемой площади являются жидкостные вертикальные грунтовые теплообменники (ВГТО) [2]. При работе в составе приточной вентиляции они по стороне жидкого теплоносителя соединены в контур с газожидкостным теплообменником (ГЖТ), в который подается приточный воздух. В качестве ВГТО в строящихся зданиях представляет интерес использовать жидкостные строительные ЭС с монолитными в них трубами, по которым циркулирует жидкий теплоноситель (рис. 1, а).

Имеется положительный опыт использования жидкостных ЭС в системах охлаждения воздуха. При этом по сравнению с жидкостными ВГТО главным преимуществом ЭС является

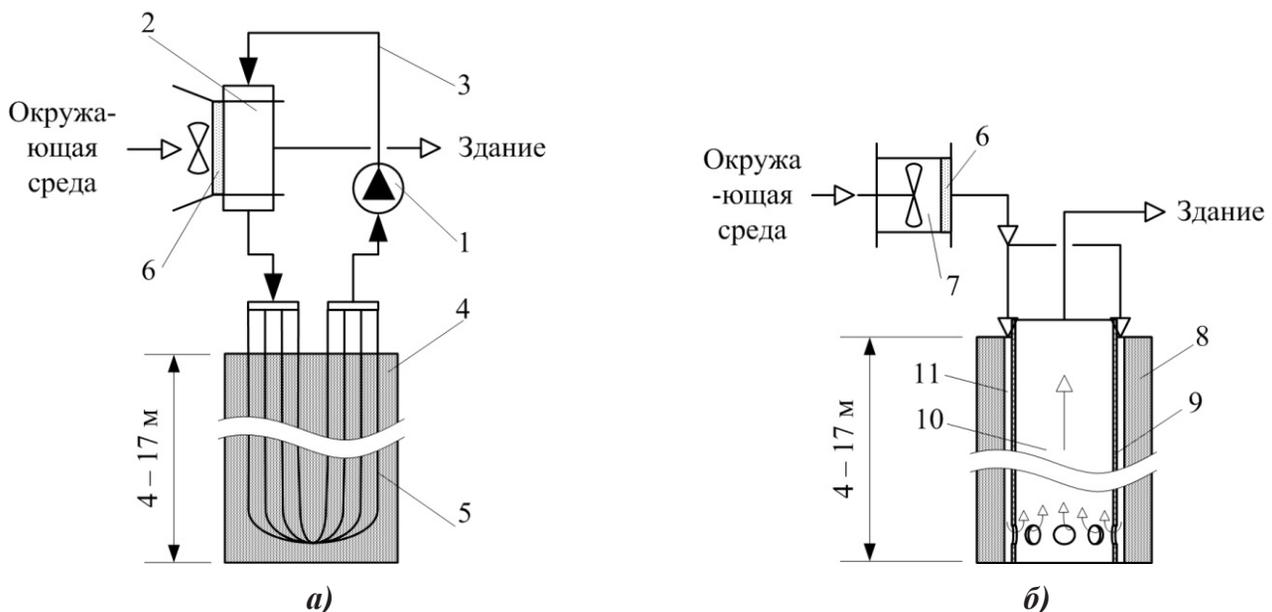


Рис. 1. Схема жидкостной (а) и воздушной (б) ЭС в составе системы приточной вентиляции: 1 – насос; 2 – ГЖТ; 3 – контур жидкого теплоносителя; 4 – свая сплошного сечения; 5 – трубы с жидким теплоносителем; 6 – фильтр; 7 – вентилятор; 8 – полая свая; 9 – центральная труба; 10 – центральный канал; 11 – кольцевой канал.

отсутствие затрат на установку скважины, которые включаются в затраты на строительство здания [3]. Одним из путей дальнейшего снижения капитальных затрат в таких системах может быть переход на непосредственное охлаждение воздуха в ЭС и отказ от использования дополнительного ГЖТ. Благодаря тому, что диаметры стандартных свай (более 400 мм) значительно превышают диаметры скважин под ВГТО (100...200 мм), в ЭС может быть создана поверхность теплообмена, достаточная для компенсации характерно низких коэффициентов теплоотдачи со стороны воздуха.

Схема воздушной ЭС в составе системы приточной вентиляции представлена на рис. 1, б. В этом случае используется ЭС, представляющая собой полую сваю круглого сечения, в центральную полость которой установлена труба из низкотеплопроводного материала с несколькими отверстиями на нижнем конце. Воздух, поступающий в образованный внутренней поверхностью сваи и наружной стенкой центральной трубы кольцевой канал, движется вниз. Достигнув нижней точки кольцевого канала и пройдя через отверстия в трубе, воздух по ней поднимается вверх. Далее воздух направляется в систему вентиляции. При этом за счет разности температур прилегающего грунта и воздуха в кольцевом канале происходит охлаждение либо нагрев воздуха.

Для сравнительной оценки двух представленных схем была составлена численная модель, включающая расчеты теплового режима грунта, ЭС и ГЖТ.

Математическая модель

При работе рассматриваемых систем в прилегающем к ЭС массиве грунта принимается нестационарный перенос теплоты теплопроводностью. Здесь приняты следующие допущения. ЭС находятся друг от друга на таком расстоянии, что не происходит их взаимного теплового влияния. Тепловой поток от поверхности ЭС распространяется в радиальном направлении, переносом теплоты в вертикальном направлении пренебрегается. С учетом этих допущений решалось уравнение теплопроводности для области грунта:

$$\frac{\partial t_{soil}}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t_{soil}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{soil}}{\partial r} \right), \quad (1)$$

с граничным условием 1 рода на расстоянии $r = r_{\infty}$:

$$t_{soil} \Big|_{r=r_{\infty}} = t_0 \quad (2)$$

и граничным условием 3 рода на поверхности скважины:

$$\lambda \frac{\partial t_{soil}}{\partial r} \Big|_{r=r_{bor}} = \alpha_{eff} \left(t_{soil} - \frac{t'_{EP} + t''_{EP}}{2} \right). \quad (3)$$

Радиус теплового влияния r_{∞} принимался равным 5 м. Температура грунта в естественном состоянии t_0 принималась равной 8 °С. Эффективный коэффициент теплоотдачи α_{eff} учитывает режим работы и сопротивление теплопередаче ЭС. Представим далее порядок решения.

В соответствии с работами [4, 5] при известной средней температуре стенки скважины определяем температуру теплоносителя на выходе ЭС:

$$t''_{EP} = At'_{EP} + Bt_{bor}. \quad (4)$$

Коэффициенты А, В в уравнении (4) являются функциями сопротивления теплопередаче ЭС, расхода теплоносителя и его теплофизических свойств [4]. Тепловой поток ЭС определяется уравнением:

$$Q = F_{EP} \alpha_{eff} \left(t_{bor} - \frac{t'_{EP} + t''_{EP}}{2} \right) = G_{EP} c_{EP} (t''_{EP} - t'_{EP}). \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) получаем эффективный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{eff} = \frac{2BG_{EP}c_{EP}}{(1+A)F_{EP}}. \quad (6)$$

При определении параметров работы системы с жидкостной ЭС модель дополнялась уравнениями теплового баланса и теплопередачи для ГЖТ:

$$Q = G_{EP}c_{EP} (t''_{EP} - t'_{EP}) = G_{air}c_{air} (t''_{air} - t'_{air}), \quad (7)$$

$$Q = kF_{HE}\Delta t_m. \quad (8)$$

При расчете коэффициентов теплоотдачи, входящих в k , и аэродинамического сопротивления ГЖТ использованы зависимости работы [6].

Изменение температуры атмосферного воздуха соответствовало гармоническому закону:

$$t'_{air} = \bar{t}_{air} + A_{air} \sin\left(\frac{2\pi}{3600 \cdot 24} \tau\right). \quad (9)$$

Уравнение (1) с граничными условиями (2) и (3) решалось методом конечных разностей. При этом α_{eff} и температуры t'_{EP} , t''_{EP} , t''_{air} в случае системы с жидкостной ЭС определялись при решении системы уравнений (4), (6) – (8). В случае системы с воздушной ЭС температура на входе в ЭС t'_{EP} принималась равной температуре атмосферного воздуха по формуле (9), а изменение параметров системы определялось при совместном решении уравнений (1), (4), (6).

Характеристики системы с жидкостной ЭС и ГЖТ

В качестве ГЖТ принят теплообменник из биметаллических ребристых труб с накатными алюминиевыми ребрами из сплава АД1М, материал внутренних несущих труб – углеродистая сталь 10. Коэффициент оребрения составляет 7,05, несущие трубы – 12×1,25 мм. Параметры ребер: диаметр 26 мм, высота 5,75 мм, шаг 2,3 мм и толщина 0,33 мм. Толщина наружной алюминиевой оболочки составляла 1,25 мм; число заходов ребра 1; длина оребренной части трубы 500 мм. Количество рядов по ходу движения воздуха 8, количество труб в одном ряду 9. ГЖТ соединен с ЭС сплошного круглого сечения диаметром 800 мм, в которой полиэтиленовые трубы 64×6 мм расположены по окружности диаметром 600 мм. Количество нисходящих труб – 4, восходящих – 4, высота ЭС – 10 м.

В контуре ГЖТ и жидкостной ЭС организована циркуляция 46,4 %-го водного раствора этиленгликоля с расходом 0,3 кг/с, расход воздуха в ГЖТ – 0,073 кг/с. Теплопроводность материала ЭС принята равной 1,28 Вт/(м·К). Теплофизические свойства грунта: теплоемкость 1100 Дж/(кг·К); плотность 1850 кг/м³; теплопроводность 2 Вт/(м·К).

Характеристики системы с воздушной ЭС

В случае использования воздушной ЭС за ос-

нову взята полая свая круглого поперечного сечения с наружным диаметром 800 мм и внутренним диаметром 600 мм. Использована центральная труба размером 540×50 мм. Теплофизические свойства трубы, сваи и грунта, расход воздуха принимались как в случае с жидкостной ЭС и ГЖТ. Расчет потерь давления в воздушном тракте рассматриваемой ЭС проводился по уравнениям подобия для вынужденного движения в каналах.

Результаты моделирования

Моделировалась работа двух систем на основе схем по рис. 1 в теплый период года. Исследуемый период составлял 10 дней, изменение температуры атмосферного воздуха соответствовало зависимости (9) со средней суточной температурой воздуха $\bar{t}_{air} = 20$ °С и амплитудой $A_{air} = 7$ °С. Параметры теплообменников и расходы рабочих сред приведены выше. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что в рассматриваемых условиях в теплый период года воздух охлаждался на 3...6 °С, средняя суточная температура воздуха на входе в систему вентиляции с те-

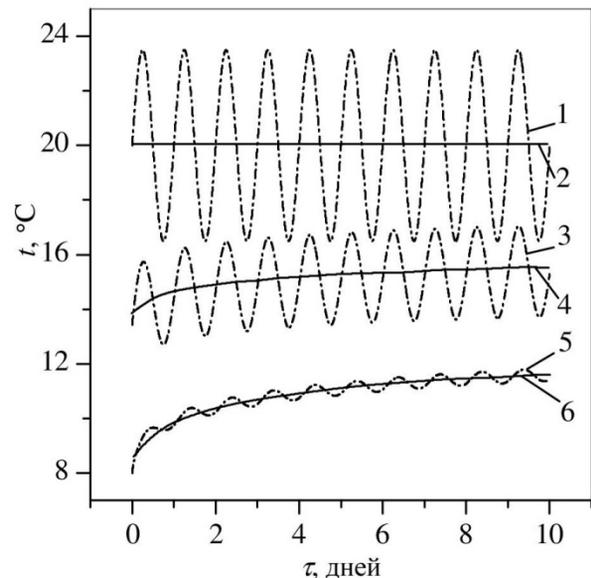


Рис. 2. Параметры работы воздушной ЭС в составе системы приточной вентиляции в теплый период года: 1 – t'_{air} ; 2 – среднее суточное значение \bar{t}_{air} ; 3 – t''_{air} ; 4 – среднее суточное значение \bar{t}_{air} ; 5 – t_{bor} ; 6 – среднее суточное значение \bar{t}_{bor} .

чением времени увеличивалась из-за нагрева грунта вблизи ЭС (кривые 5 и 6), стремясь к постоянному значению, причем для обеих рассмотренных систем изменение температуры подаваемого в систему вентиляции воздуха t''_{air} различалось незначительно.

Описываемые системы могут также эксплуатироваться в холодное время года, когда температура грунта на глубинах ниже уровня сезонных колебаний превышает температуру окружающего воздуха. Такая особенность теплового режима грунта может быть использована для подогрева приточного воздуха, что снизит тепловые потери. Для моделирования данного режима работы был проведен расчет. Средняя температура $t_{air,m}$ принималась равной $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, остальные параметры оставались те же, что и при охлаждении воздуха. В этом случае наблюдался аналогичный характер изменения температур, при этом приточный воздух нагревался на $6...9\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя суточная температура воздуха на входе в систему вентиляции постепенно уменьшалась, стремясь к некоторому постоянному значению.

Получено, что затраты энергии на транспортировку воздуха для рассмотренных вариантов не превышала $0,3\%$ от теплового потока ЭС. Таким образом, система грунтового охлаждения/нагрева воздуха на основе ГЖТ и жидкостной ЭС может быть заменена на систему с прямым нагревом приточного воздуха в воздушной ЭС. Это позволит отказаться от использования дополнительного ГЖТ и жидкого теплоносителя, что решает проблему герметичности системы и снижает эксплуатационные и капитальные затраты.

Совместная работа теплового насоса и энергетической сваи

Одним из способов использования низкопотенциальной теплоты окружающей среды в системах теплоснабжения является применение ТН, использующих в качестве источника теплоты атмосферный воздух. Благодаря его высокой температуре в теплый период года, например в случае использования ТН для нужд горячего водоснабжения, их теплопроизводительность Q и коэффициент трансформации ε достаточно

высок. Тем не менее, в холодное время года вследствие значительного падения температуры атмосферного воздуха теплопроизводительность и коэффициент трансформации ТН сильно падают. Решением этой проблемы может быть предварительный подогрев атмосферного воздуха в воздушной ЭС и дальнейшая его подача в испаритель ТН. Повышение температуры воздуха на входе в испаритель приведет к более эффективной работе ТН.

Для количественной оценки энергетического эффекта при работе ТН в таком режиме был проведен анализ воздушного ТН марки WPL 60 I/II производителя Buderus. При проведении расчетного исследования использованы представленные в [7] зависимости коэффициента трансформации ε и теплопроизводительности Q от температуры воздуха на входе в испаритель при температуре теплоносителя системы теплоснабжения на выходе из конденсатора теплового насоса $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Количество ЭС принималось 12. При номинальном расходе воздуха в испарителе теплового насоса $2500\text{ м}^3/\text{ч}$ и параллельной подаче его в ЭС расход воздуха на одну сваю составит $0,073\text{ кг/с}$. Изменение температуры атмосферного воздуха соответствовало зависимости (9) с $\bar{t}_{air} = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $A_{air} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Период исследования составлял 10 дней. Изменение температуры воздуха на выходе из воздушной ЭС получено при решении системы уравнений (1), (4) – (6). Затем по данной температуре воздуха рассчитывались теплопроизводительность и коэффициент трансформации ТН. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Было установлено увеличение теплопроизводительности ТН с $4,3$ до $5,5...6,3\text{ кВт}$ (увеличение на $18...47\%$) и коэффициента трансформации с $1,6$ до $2...2,3$ (увеличение на $25...30\%$). Падение температуры воздуха на выходе ЭС связано с охлаждением грунта вблизи сваи.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предварительный подогрев воздуха в ЭС перед подачей его в испаритель ТН может быть эффективным способом увеличения энергетических показателей работы ТН, а соответственно и снизить затраты на теплоснабжение потребителей в холодный период года.

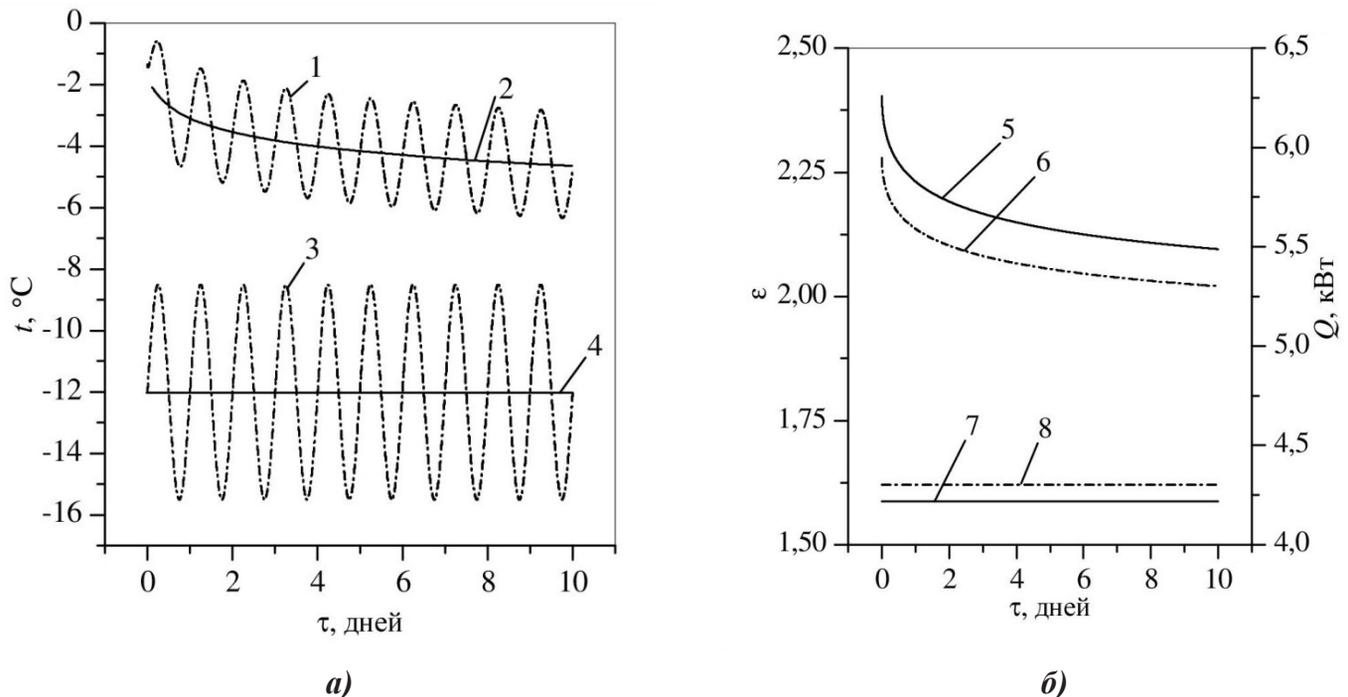


Рис. 3. Изменение параметров работы системы ТН и ЭС: 1 – температура воздуха после воздушной ЭС; 2 – средняя суточная температура воздуха после воздушной ЭС; 3 – температура атмосферного воздуха; 4 – средняя суточная температура атмосферного воздуха; 5, 6 – среднее суточное значение Q и ε ТН соответственно при подаче в испаритель подогретого воздуха; 7, 8 – среднее суточное значение Q и ε ТН соответственно при подаче в испаритель атмосферного воздуха.

Выводы

На основе численного моделирования установлено, что при использовании ЭС с теплоносителем воздух в составе системы приточной вентиляции в рассмотренных условиях в теплый период года происходило понижение температуры приточного воздуха на 3...6 °С, а в холодный период – его нагрев на 6...9 °С, при этом на транспортировку воздуха затрачивалось энергии не более 0,3% от теплового потока ЭС. Параметры воздуха при работе жидкостной и воздушной ЭС в составе системы приточной вентиляции отличаются незначительно.

При совместной работе воздушного ТН с воздушной ЭС в холодный период года увеличение его теплопроизводительности составляет 18...47 %, а коэффициента трансформации – 25...30 % по сравнению со случаем, когда в испаритель теплового насоса подается непосредственно атмосферный воздух.

Таким образом, применение воздуха в ка-

честве теплоносителя систем использования энергетического потенциала верхних слоев грунта, ставшее возможным с появлением такого класса грунтовых теплообменников, как энергетические сваи, может сопровождаться не только увеличением энергетических показателей, но и повысить экологическую безопасность таких систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басок Б.И., Накорчевский А.И., Беляева Т.Г., Чалаев Д.М., Недбайло А.Н., Голуб И.С. Экспериментальный модуль гелиогеотермальной установки для теплоснабжения // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 1. – С. 69–78.
2. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Оптимальная конструкция грунтовых теплообменников // Пром. теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 6. – С. 27–31.
3. Гершкович В.Ф. Энергетические сваи // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2009. – № 8. – С. 47 – 50.

4. *Филатов С.О., Володин В.И.* Численное моделирование совместной работы утилизатора теплоты грунта с теплоприемником // Труды БГТУ. – 2012. – № 3 – С. 179 – 183.

5. *Eskilson, P., Claesson, J.* Simulation model for thermally interacting heat interacting heat extraction boreholes // Numerical Heat Transfer. – 1988. – Vol. 13. – P. 149–165.

6. *Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник / Под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.*

7. *Справочник по проектированию и монтажу тепловых насосов. Проектная документация. Buderus. – 2005. – 142 с.*

EFFICIENCY OF USE OF ENERGY PILES WITH A HEAT TRANSFER MEDIUM AIR IN VENTILATION AND HEAT SUPPLY SYSTEMS

S.A. Filatau, V.I. Valodzin

Belarusian State Technological University,
vul. Sverdlova 13a, 220006, Minsk, BELARUS

The efficiency of applying of energy piles with air as a heat transfer medium in the ventilation and heat pump heating systems were rewire on the basis of numerical simulation. References 7, figures 3.

Key words: ventilation systems, energy piles, heat pump, air-ground heat exchanger, the energy of the ground.

Получено 31.01.2013
Received 31.01.2013