

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РЕАЛИЯХ ПРИДНЕПРОВСКОГО РЕГИОНА

*В статье показаны основные тенденции изменения стоимости тепловой энергии с учетом инвестиционной составляющей для небольших систем теплоснабжения, на базе возобновляемых источников энергии: солнечного нагревателя и грунтового теплового насоса с сезонным аккумулятором тепла.*

*У статті показано основні тенденції зміни вартості теплової енергії з врахуванням інвестиційної складової для невеликих систем теплопостачання, на базі поновлюваних джерел енергії: сонячного нагрівача і грунтового теплового насоса з сезонним акумулятором тепла.*

### Постановка проблемы

Наличие эффективного сезонного теплового аккумулятора, соотношение доли солнечного и геотермального тепла являются определяющими факторами стоимости и срока окупаемости проекта.

На рис. 1 показана функциональная схема системы теплоснабжения потребителей.

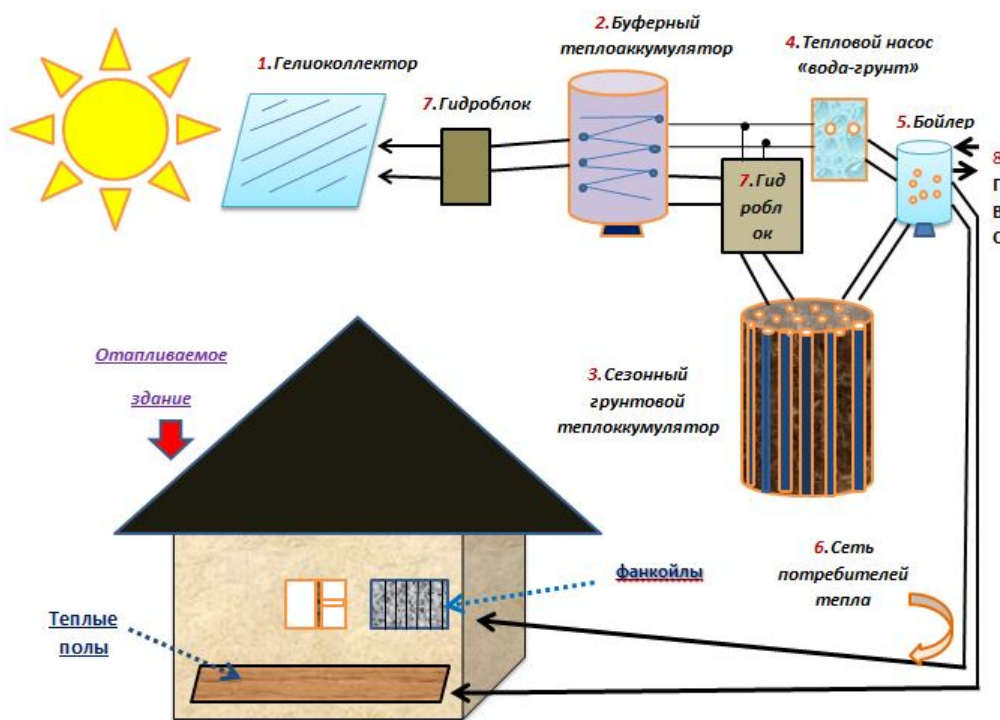


Рис.1. Схема системы теплоснабжения с возобновляемыми источниками энергии

Система состоит из: 1 – солнечного нагревателя (гелиоколлектора - ГК), 2 – водяного буферного теплоаккумулятора (для краткосрочного хранения тепла), 3 – сезонного (долгосрочного) грунтового теплоаккумулятора – ТА типа BTES (Borehole Thermal Energy

Storage), состоящего из U-образных полиэтиленовых тепловых зондов, опущенных в скважины таким образом, чтобы оконтурить часть подземного пространства в виде углубленного цилиндра или параллелепипеда, 4 – грунтового теплового насоса с 5 – бойлером. Все эти устройства, в комплексе, работают на 6 – тепловую нагрузку в виде сети потребителей тепла.

Циркуляция теплоносителей по контурам осуществляется циркуляционными насосами, встроенными в гидроблоки – 7, которые, в свою очередь, регулируют температуру теплоносителя и управляются центральным контроллером.

Принцип работы такой системы основан на использовании солнечной энергии и геотермального тепла для отопления зданий.

Летом используется бесплатное солнечное тепло: прогретый гелиоколлектором теплоноситель (+40 ...+60°C), циркулирует по грунтовому контуру и прогревает объем сезонного грунтового теплоаккумулятора, поднимая температуру обводненного грунта до +20-40 °С.

В отопительный сезон, система работает на выемку тепла из сезонного теплоаккумулятора через буферный теплообменник, что не исключает пополнения тепловых запасов в буферном накопителе от гелиоколлектора в солнечные дни.

Когда сезонный ТА охлаждается до температуры 10–15 °С, близкой к температуре окружающего грунта, тепловой начинает забирать из него низкопотенциальное тепло.

Вспомогательный нагреватель-бойлер при необходимости «догревает» отопительный контур и осуществляет горячее водоснабжение.

### Инженерная модель

Для расчета экономических показателей составлена инженерная модель системы, описывающая основные рабочие процессы:

- получение солнечного тепла с помощью гелиоколлекторов;
- хранение тепла в сезонном ТА;
- выемка накопленного солнечного тепла тепловым насосом из сезонного ТА;
- выемка тепловым насосом низкопотенциального тепла из окружающего грунта после охлаждения сезонного ТА.

Для расчета характеристик системы используются инженерные методы, основанные на базовых физических зависимостях и экспериментальных данных по отдельным параметрам. Точность таких расчетов позволяет проводить предпроектный технико-экономический анализ систем теплоснабжения.

Процесс получения солнечного тепла описывается уравнением нагрева теплоносителя в гелиоколлекторе (2):

$$P_u = F_r * A [H * R(r * \alpha) - V_i(t_m - t_a) * T]_{hc}$$

где:  $P_u$  – теплота, полученная от коллектора;

$F_r$  – комплексный коэффициент эффективности отвода тепла;

$A$  – поглощающая площадь коллектора;

$H$  – интенсивность солнечной радиации на горизонтальной плоскости в данном регионе;

$R$  – коэффициент преобразования «горизонт-наклон»;

$r$  – пропускная способность покрытия;

$V_i$  – коэффициент теплопередачи;

$\alpha$  – поглощающая способность пластин;

$t_m$  – температура теплоносителя на входе коллектора;

$t_a$  – температура окружающей среды;

$T_{hc}$  – эффективное время работы коллектора.

Интенсивность солнечной радиации для Приднепровского региона определяется по данным NASA опубликованным на сайте этой организации.

Все остальные характеристики ГК приняты применительно к вакуумным трубчатым нагревателям, работающим в летнее и зимнее время.

Расчет теплопереноса из/в грунтовый сезонный ТА определяется по формуле:

$$P_{BTES} = U_A * (t_f - t_{stk})$$

где:  $P_{BTES}$  – теплота в/из ТА;

$t_f$  – средняя температура теплоносителя в теплообменнике (оценивается как среднее входной и выходной температур);

$t_{stk}$  – средняя температура грунта в ТА;

$U_A$  – аккумулирующая способность сезонного ТА. Зависит от суммарной длины скважин и теплового сопротивления прискважинной зоны и грунта.

Тепловое сопротивление грунта рассчитывается для окружности вокруг каждой скважины. Для квадратичного или гексагонального расположения скважин сезонного ТА описывается выражением (3):

$$R_{sf} = \frac{1}{2} \pi \lambda \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{A_p}}{\sqrt{\pi}} \right) * r_b - 0,75 \right] + R_b^* , \quad \text{при } \frac{\sqrt{A_p}}{\sqrt{\pi}} * r_b \geq 15 ,$$

где:  $R_{sf}$  – тепловое сопротивление грунта в установившемся режиме;

$\lambda$  – средняя теплопроводность грунта;

$r_b$  – радиус бурения скважины;

$R_b^*$  – эффективное тепловое сопротивление самой скважины;

$A_p$  – площадь теплохранилища вокруг каждой скважины;

Таким образом, аккумулирующая способность связана с конструктивными параметрами BTES:

$$U_A = \frac{(n * H)}{R_{sf}} ,$$

где:  $n$  – количество скважин-зондов грунтового теплообменника;

$H$  – глубина зондов.

Удельная теплоемкость т BTES оценивается по объемной теплоемкости грунта и объему ТА:

$$C_{sp} = \rho c * V_{BTES} = \rho c * n * A_p * H ,$$

где:  $\rho c$  – средняя объемная теплоемкость;

$V_{BTES}$  – объем сезонного ТА;

$C_{sp}$  – удельная теплоемкость ТА;

Максимальное количество тепловой энергии, которое может храниться в сезонном ТА зависит от максимальной и минимальной температур хранения, на протяжении сезонного цикла.

$$C = C_{sp} (t_{stk \max} - t_{stk \min}) ,$$

где:  $t_{stk \max}$  – максимальная температура хранения;  $t_{stk \min}$  – минимальная температура хранения.

При хранении тепла в ТА теплопотери, в основном, обусловлены кондуктивным теплообменом, т. к. при выборе места бурения тепловых зондов предпочтение отдается тому,

где низкий коэффициент фильтрации подземных вод ( $\leq 10$  м/год)

$$P_{loss} = U_A (t_{stk moy} - t_o) * T_{year} ,$$

где:  $P_{loss}$  – годовые теплотери ТА ;

$t_{stk moy}$  – среднегодовая температура хранения тепла;

$t_o$  – окружающая температура грунта;

$T_{year}$  – длительность годового хранения.

В целом, конструкция сезонного ТА типа BTES – несложная, что дает возможность оценить стоимостные показатели при его строительстве.

Таким образом, вкратце, описаны методики оценки количества полученного и запасенного солнечного тепла. Остается, оценить режим функционирования системы работающей с использованием низкопотенциального тепла грунта (при охлаждении грунтового теплоаккумулятора до  $t_{stk} \approx t_o = 8-12^\circ\text{C}$ ).

В этом случае обогрев зданий осуществляется тепловым насосом, минуя буферный теплообменник.

Количество тепла, при этом можно оценить исходя из усредненных эмпирических данных по региону:

$$N_t = N_{\text{э}} + N_{geo} = N_{\text{э}} (1 + COP) ,$$

где:

$N_t$  – тепловая мощность на выходе теплового насоса;

$N_{\text{э}}$  – электрическая мощность, потребляемая компрессором;

$COP$  – коэффициент преобразования теплового насоса;

$N_{geo} = N_{\text{э}} * COP$  - геотермальная тепловая мощность, полученная из грунта, при соблюдении избыточного подвода тепла из грунта.

По опыту монтажа и эксплуатации грунтовых тепловых насосов в Приднепровском регионе, с одного погонного метра теплового зонда снимается, в среднем,  $g \approx 50$  Вт/м тепловой мощности. При таком съеме тепла исключен режим «заморозки» грунта на протяжении отопительного периода и большинство тепловых насосов оснащается тепловыми зондами, именно, исходя из такого соотношения.

Из этого сразу вытекает верхнее значение тепловой мощности, которую можно получить из зондов грунтового тепло – аккумулятора с помощью теплового насоса:

$$N_t^* = (n * H * g) * \frac{COP}{(COP - 1)} ,$$

где:  $N_{geo} = n * H * g$

Количество тепла  $P_p$ , которое может дать тепловой насос при работе с «холодным» ( $\leq 15^\circ\text{C}$ ) грунтом:

$$P_p = N * t_{T_p} ,$$

где:  $T_p$  – моторное время работы теплового насоса.

Для оценки экономических показателей системы теплоснабжения применим балансовый метод расчета энергетических потоков между основными функциональными элементами на протяжении года (рис. 2):

$P_{out}$  – выходной поток тепловой энергии от системы к потребителю;

$P_{add}$  – затраты энергии на догрев теплоносителя во вспомогательном нагревателе (электрическом, газовом, твердотопливном);

$P_{el\ tp}$  – затраты электроэнергии на работу грунтового теплового насоса;  
 $P_{ext}$  – тепловая энергия, изымаемая из сезонного ТА;  
 $P_{inj}$  – тепловая энергия, инжектируемая в сезонный ТА;  
 $P_{loss}$  – потери тепловой энергии в сезонном ТА;  
 $P_{ext\ tp}$  – низкопотенциальная, геотермальная тепловая энергия, изымаемая грунтовым тепловым насосом.

**Оценка экономических показателей системы теплоснабжения.**

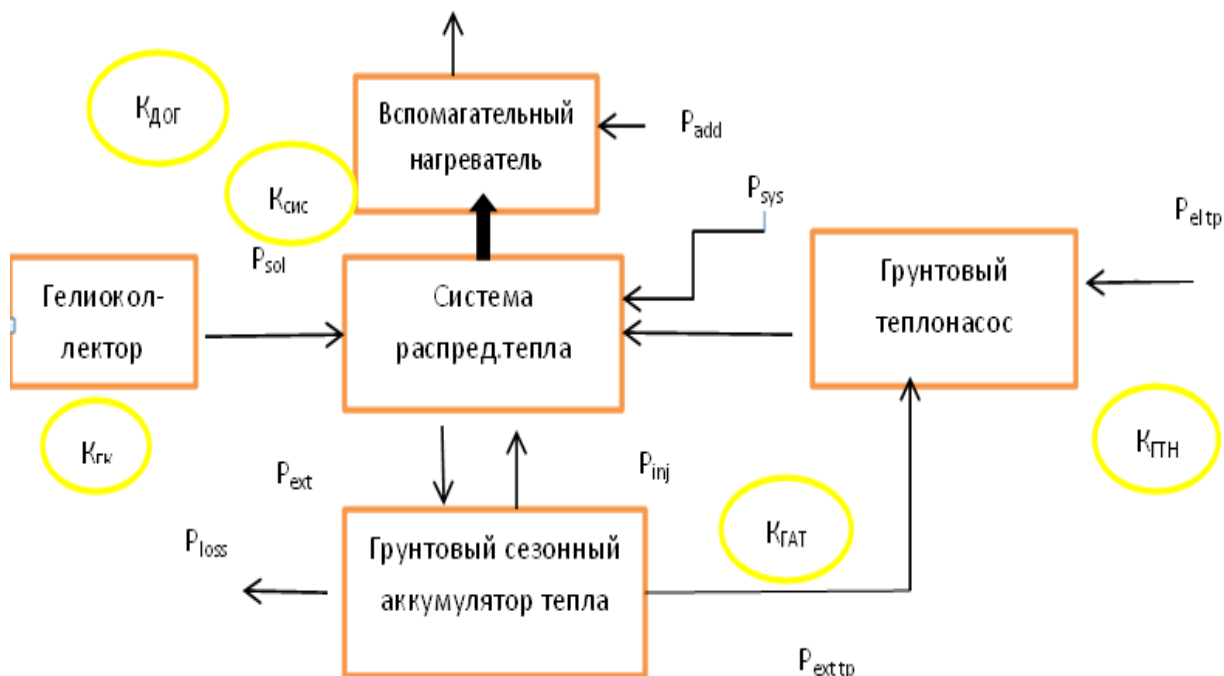


Рис 2. Балансовая модель системы теплоснабжения

В качестве комплексной оценки стоимости тепловой энергии применим показатель, учитывающий эксплуатационные и капитальные затраты для системы теплоснабжения (4):

$$C_{out} = (K * f_a + C_{exp}) + \frac{C_{exp}}{P_{out}}$$

где:  $K$  – суммарные капитальные затраты на систему теплоснабжения:

$$K = K_{ГК} + K_{сис} + K_{дог} + K_{ГТН} + K_{ГАТ}$$

$K_{ГК}$  – капзатраты на гелиоколлекторы;

$K_{сис}$  – капзатраты на систему распределения тепла с буферным теплообменником;

$K_{дог}$  – капзатраты на вспомогательный нагреватель;

$K_{ГТН}$  – капзатраты на грунтовый тепловой насос;

$K_{ГАТ}$  – капзатраты на сезонный грунтовый аккумулятор тепла;

$f_a$  – коэффициент аннуитета;

$$f_a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n} - 1$$

$i$  – месячная ставка кредита;

$n$  – число лет кредитования;

$P_{out}$  – тепловая энергия, вырабатываемая системой в течение года (кВт·ч);  
 $Z_{exp}$  – эксплуатационные затраты на обслуживание системы (амортизация, оплата оператора и т. п.);  
 $Z_{enter}$  – затраты на производство тепловой энергии:

$$Z_{enter} = 3P_{add} + 3P_{eltp} + 3P_{sys},$$

где:  $3P_{add}$  – затраты на энергоносители для дополнительного нагрева теплоносителя потребителю;  $3P_{eltp}$  – затраты на электроэнергию для грунтового теплового насоса, работающего в компрессионном цикле;  $3P_{sys}$  – затраты электричества на потребленную тепловую энергию т. е. на электроэнергию насосов, поддерживающих циркуляцию теплоносителей в системе, работу автоматики и т. п.).

В качестве базового варианта для сравнения можно принять электроотопление с промышленным тарифом 1,05 грн/кВт·час и природный газ стоимостью 5,0 грн/куб.

В качестве основного масштабирующего фактора предлагается принять выходную тепловую мощность грунтового теплонасоса. В качестве базовых приняты тепловые насосы украинского производства фирмы В.Д.Е. (г. Киев), их технические и стоимостные параметры используются в расчете. Их мощность варьировалась по линейке машин от 12,2 до 150 кВт. Вторым варьируемым параметром – SE является процентная доля солнечной энергии в суммарной энергии нагрева (доля ГК).

Объем сезонного ТА типа BTES выбирается исходя из мощности теплового насоса, с учетом возможности его заполнения летом солнечным теплом. Расчеты проводились с учетом смет и калькуляций, предоставленных ТМ «Гейзер» на строительство геотермальных полей, подземных тепловых резервуаров и тепловых насосов. Стоимость материалов и основных ресурсов принималась по состоянию на 2011–2012 г.г.

Результаты расчетов приведены на рис. 3–5.

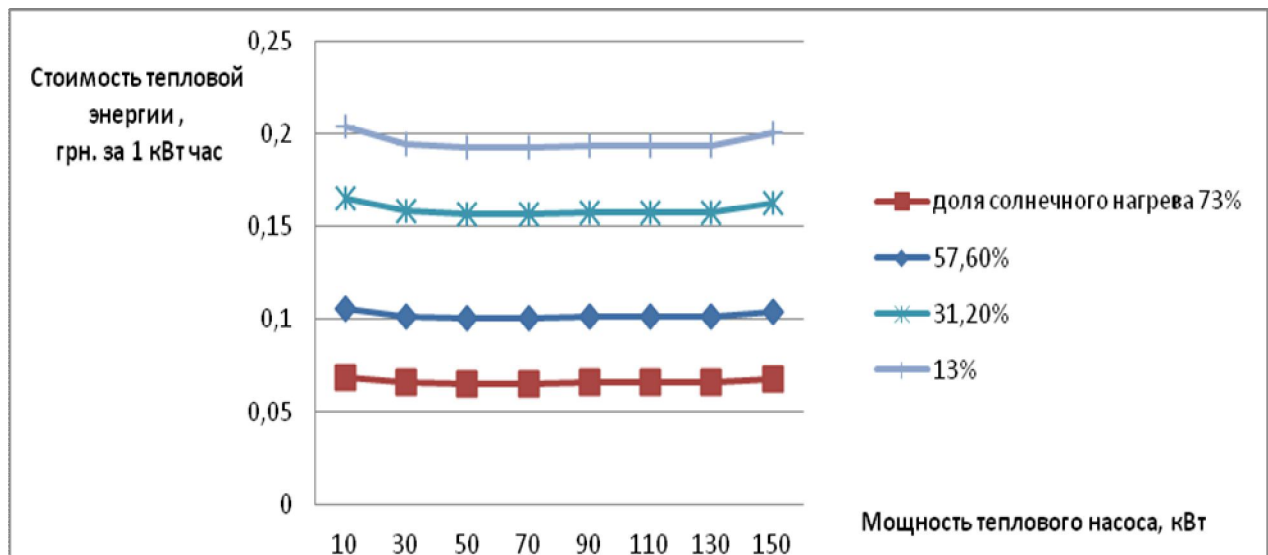


Рис. 3. Зависимость стоимости тепловой энергии от мощности теплоотдачи системы и доли солнечного нагрева в ее производстве

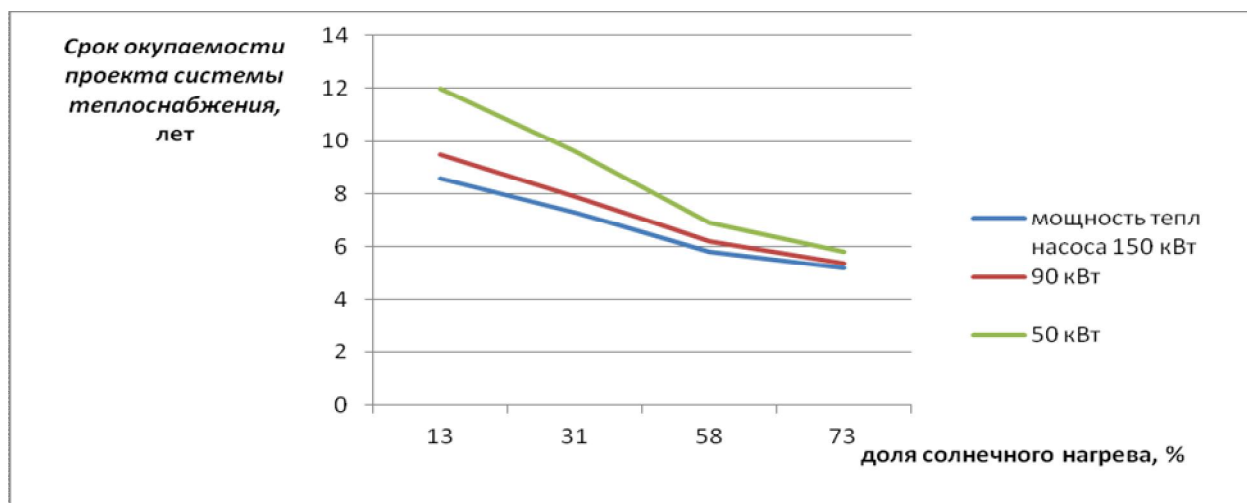


Рис. 4. Зависимость срока окупаемости проекта от доли солнечного нагрева в производстве тепла.

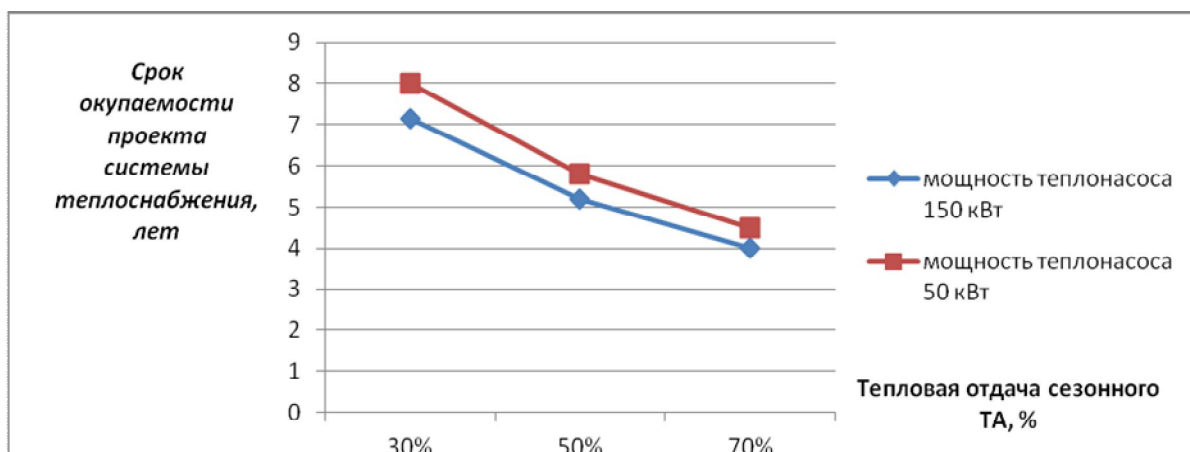


Рис. 5. Зависимость срока окупаемости проекта от теплоотдачи сезонного ТА

### Выводы

Применение солнечных коллекторов в тандеме с грунтовыми тепловыми насосами для обогрева в Приднепровском регионе, актуально при использовании эффективных сезонных грунтовых тепловых аккумуляторов с возможностью изъятия более 50 % тепла, накопленного летом. В этом случае, небольшой срок окупаемости проекта до 3–4 лет, наблюдается при достижении доли суммарной солнечной энергии в нагреве 70–75 %. Дальнейшее увеличение доли солнечного тепла ограничивается общей теплоемкостью сезонного аккумулятора.

Применение компрессорного грунтового теплового насоса с его температурными режимами, дает возможность эффективно использовать сезонный грунтовой тепловой аккумулятор за счет более интенсивного теплообмена при невысоких температурах 20–25 °С хранения тепла в грунте. Невысокие температуры сезонного хранения, в свою очередь, снижают потери тепла и не требуют применения тепловых зондов с повышенными рабочими температурами.

При снижении доли солнца в нагреве < 65 %, экономические параметры таких комбинированных систем приближаются к параметрам обычных систем с грунтовыми тепловыми насосами (срок окупаемости 5–7 лет). При этом нерентабельно строительство дорогостоящих буферных тепловых резервуаров. В случае неинтенсивного использования

солнечного тепла, гелиоколлекторы только ухудшают экономику и эффективнее обходиться только грунтовым тепловым насосом, как источником тепла.

#### **Список литературы**

1. J. Nußbicher, D.Mangold etc.”Solar assisted heating system with seasonal duch heat store in Neckarsuim-Amorbach (Germany)”. EuroSun2004, 14 Int. Sonnenforum, Freiburg .20-23/06/2004.
2. У. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. Расчет систем солнечного теплоснабжения. М., Энергоиздат, 1982, 80 с.
3. Daniel Pahud “ The design of a borehole thermal energy storage requires dynamic system simulation, especially for a system without heat pump. “ SUPSI-DCT-LEE Laboratoria di Energia ,Ecologia ed Economia , 12/05/2002, P.P. 66–81.
4. Сайт компании «Спецклиматсервис» <http://s-climate-s.com.ua>
5. Сайт ТМ «Гейзер» <http://skvagina.dp.ua/>

#### **TECHNICAL AND ECONOMICAL CHARACTERISTICS OF HEATING SYSTEM BASED ON RENEWABLE SOURCES OF POWER USING DNIPRO REGION AS A CASE STUDY**

P. O. FEDOROV, Candidate of Engineering, director general  
A. P. FEDOROVA

*The paper shows main trends for changes in the cost of heat energy considering investment component for small heat supply systems based on renewable sources of power: solar heater and earth heat-pump with the seasonal heat accumulator.*

Поступила в редакцию 21.04 2013 г.