

УДК 620.92: 504.064

Э.А.Бекиров, докт.техн.наук, **Д.В.Каркач**, **А.Н.Абибулаев**,
С.Н.Воскресенская, канд.техн.наук, **М.М.Асанов**, канд.физ.-мат.наук (Национальная академия
природоохранного и курортного строительства, Симферополь)

Уменьшение экологического риска от загрязнения атмосферы при использовании возобновляемых источников энергии

В работе рассмотрены возможности оптимизации энергоснабжения курортного города Балаклава с использованием возобновляемых источников энергии – теплоэнергетических гелиосистем, работающих параллельно с котельными. Территорией для обеспечения поступления солнечного излучения на поверхность гелиоколлекторов является водный бассейн отработанного карьера. Применение возобновляемых источников энергии обеспечивает экологическую безопасность и уменьшает риск заболеваемости в результате уменьшения выбросов вредных веществ при работе котельных.

Ключевые слова: возобновляемый источник энергии, гелиоколлектор, теплоэнергетическая система, экологическая безопасность, отработанный карьер.

В роботі розглянуто можливості оптимізації енергопостачання курортного міста Балаклава з використанням відновлюваних джерел енергії – теплоенергетичних геліосистем, що працюють паралельно з котельнями. Територією для забезпечення надходження сонячного випромінювання на поверхню геліоколекторів є водний басейн відпрацьованого кар'єру. Застосування відновлюваних джерел енергії забезпечує екологічну безпеку та зменшує ризик захворюваності в результаті зменшення викидів шкідливих речовин при роботі котельні.

Ключові слова: відновлюване джерело енергії, геліоколектор, теплоенергетична система, екологічна безпека, відпрацьований кар'єр.

Введение. Анализ риска как количественной оценки на региональном уровне, где сосредоточен потенциал опасных объектов, особенно важен для рекреационной зоны санаторно-курортных объектов Крыма. В процессе оценки риска рассмотрим границы исследуемого региона Крыма – г. Балаклаву. Риск при функционировании объектов жилищно-коммунального хозяйства г. Балаклавы – котельных, обеспечивающих теплоснабжение и горячее водоснабжение домов и другой инфраструктуры, может быть обусловлен за счет выбросов опасных веществ, сбросов неочищенных стоков в количествах, превышающих санитарно-гигиенические нормативы и оказывающих постоянное воздействие на здоровье населения и окружающую среду. Оценка риска включает анализ частоты, анализ последствий и их сочетание при работе котельных г. Балаклавы, работающих на мазуте и газе.

Анализ публикаций. Вопросы, связанные с оптимизацией работы электрических сетей, электростанций и энергосистем, рассмотрены в источниках [1–4]. При их решении необходимо

помнить, что требуется обеспечить экологическую безопасность.

Одним из вариантов улучшения экологической безопасности, уменьшения рисков от выбросов токсичных газов для курортной зоны Крыма является применение возобновляемых видов энергии для обеспечения теплоснабжения и горячего водоснабжения, в частности, использование бассейна отработанного карьера в совокупности с гелиоконцентраторами и гелиоколлекторами.

Использование возобновляемых источников энергии предопределено благоприятными климатическими условиями южного берега Крыма.

Цель и постановка задач. Целью работы является оптимизация режима распределения тепловой нагрузки в совмещенной системе, состоящей из гелиоколлекторов бассейна отработанного карьера и котельных. Основной задачей является обеспечение такого режима эксплуатации и распределения, который учитывал бы факторы возникновения экологического риска при эксплуатации котельных.

Методика дослідження. В роботі застосовуються методи рішення систем диференціальних рівнянь (рівнянь Ейлера), методи множників Лагранжа, методи оцінки енергетичних показників котельних і геліоколекторів басейна отриманого кар'єра.

Результати і їх аналіз. Розглянемо оптимізацію режимів розподілу теплової навантаження в суміщеній системі, що забезпечує теплоснабження за рахунок геліоколекторів басейна отриманого кар'єра і котельних г. Балаклави. Для режимів поставленої задачі розглянемо розподіл теплових навантажень між джерелами теплоснабження котельних і геліосистем басейна отриманого кар'єра. Задача оптимізації полягає в тому, щоб у кожному розрахунковому інтервалі всього періоду $\Delta\tau$ отримати найбільш вигідне розподілення енергозабезпечення між тепловим акумулятором отриманого кар'єра і роботою котельних по забезпеченню енергоснабження [1].

Урівняння цілі:

$$B = \sum_{i=1}^k B_i \cdot \Delta\tau_i \Rightarrow \min, \quad (1)$$

де B – витрати палива в котельних.

Витрати палива в котельних залежать від того, з якою потужністю вони будуть працювати в кожному розрахунковому інтервалі часу $i = 1, 2, \dots, k$, а, відповідно, від потужності геліосистем басейна.

Урівняння зв'язу – це витратна енергетична характеристика еквівалентних котельних і витратні енергетичні характеристики теплової енергії теплоенергетических систем (ТЕНС) геліоколекторів.

Урівняння обмежень. Для кожного розрахункового інтервалу балансове рівняння потужності може бути представлено в вигляді:

$$P_{\text{баланс}} = \sum_{t=1}^k P_t - (\sum P_K + \sum P_G) + P_{\text{ном}} = 0, \quad (2)$$

де $P_t = P_1, P_2, \dots, P_k$ – навантаження системи в інтервалі $t = 1, 2, \dots, k$; $\sum P_K$ – потужність котельних; $\sum P_G$ – потужність геліоколекторів; $P_{\text{ном}}$ – втрачені потужності в системі.

Урівняння потужності для геліоколекторної енергосистеми:

$$P_j = \sum_{t=1}^k I_{jt} \cdot S_k \cdot \Delta\psi_t, \quad (3)$$

де I_{jt} – інтенсивність сонячної радіації; S_k – площа басейна, охоплювана геліоколекторами; $\Delta\psi_t$ – коефіцієнт перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію.

Якщо проводити оптимізацію системи забезпечення теплової енергією при використанні котельних і теплоенергетическої системи з геліоколекторами, то рівняння оптимізації має вигляд [2]:

$$\frac{b}{1 + \delta_K} = \frac{i}{1 - \delta_i}, \quad (4)$$

де $b = \frac{\partial B_K}{\partial P_K}$ – відносний приріст витрат

палива котельних; $i = \frac{\partial I_j}{\partial P_K}$ – відносний

приріст теплової енергії за рахунок впливу сонячної радіації на теплоенергетическу

систему; $\delta_K = \frac{\partial P}{\partial P_K}$, $\delta_i = \frac{\partial P}{\partial P_i}$ – відносні

прирости втрат потужності в теплових мережах при зміні потужностей котельних і геліосистем відповідно.

Для виведення рівняння оптимізації необхідно знайти систему функцій, що реалізують максимум або мінімум, підкоряючись достаточним гладким додатковим умовам або рівнянням зв'язу. Іскомую систему функцій отримуємо в вигляді рішення системи диференціальних рівнянь (рівнянь Ейлера) [3]. Застосуємо необхідну умову максимуму або мінімуму функції при обмеженнях параметрів і скористаємося методом множників Лагранжа. Функція Лагранжа включає в себе формули і має вигляд:

$$\Phi = \sum_{t=1}^k B_t + \sum_{t=1}^k \lambda_t \cdot P_{\text{баланс}t} + \sum_{t=1}^k \lambda_j \cdot P_j, \quad (5)$$

де λ – множник Лагранжа.

Невідомими величинами будуть потужності котельних і j потужність теплоенергетическої геліосистеми в кожному розрахунковому t інтервалі

времени, всего $jt + t$ неизвестных мощностей. Неизвестны также множители Лагранжа. Число неизвестных равно $jt + 2t + j$. Чтобы решить задачу, необходимо составить $jt + 2t + j$ уравнений. При решении этих уравнений можно определить $jt + t$ неизвестных. Уравнения мощности теплоэнергетической системы гелиоколлекторов дают j уравнений, а балансовое уравнение мощности – t уравнений. Таким образом, число уравнений достаточно для определения неизвестных [4].

Производные по мощности для котельных имеют вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_K} = \frac{\partial B_t}{\partial P_{Kt}} + \lambda_t \cdot \left(1 - \frac{\partial P_{t-}}{\partial P_{Kt}}\right) = 0. \quad (6)$$

Из уравнения (6) получим:

$$-\lambda_1 = \frac{b_1}{1 - \delta_{Kt}}, \dots, -\lambda_k = \frac{b_k}{1 - \delta_{Kt}}. \quad (7)$$

Производные по мощности теплоэнергетической системы гелиоколлекторов имеют вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_{j\tau}} = \lambda_t \cdot \left(1 - \frac{\partial P_{\tau-}}{\partial P_{j\tau}}\right) + \lambda_j \cdot \left(1 - \frac{\partial I_{j\tau}}{\partial P_{j\tau}}\right). \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует:

$$-\lambda_1 = \frac{\lambda_{\tau} I_{\tau 1}}{1 - \delta_{\tau 1}}. \quad (9)$$

Все величины, входящие в выражение (9), за исключением множителей Лагранжа, определяются энергетическими характеристиками оборудования (относительными приростами котельных – b и ТЭНС – j) и параметрами теплоэнергетической сети (относительными приростами потерь мощности), поэтому окончательный вид уравнения оптимизации будет:

$$\frac{b_1}{1 - \delta_K} = \lambda_b \frac{t_b}{1 - \delta_b} = \lambda_e \frac{t_e}{1 - \delta_e} = \dots = \lambda_{\tau} \frac{t_{\tau}}{1 - \delta_{\tau}}. \quad (10)$$

Данное условие имеет следующий смысл: для наиболее выгодного распределения нагрузки необходимо для всего периода оптимизации соблюдать постоянное соотношение λ между котельными и теплоэнергетическими системами гелиоколлекторов, нагрузка должна распределяться по соотношению b :

$$\lambda_b = \frac{b}{1 - \delta} \bigg/ \frac{t_b}{1 - \delta_b} \quad (11)$$

и так далее.

Условия наиболее выгодного распределения нагрузки имеют вид:

$$b = \frac{\Delta \delta_K}{\Delta P_K}; i = \frac{\Delta I_j}{\Delta P_j}; b = \lambda I; \lambda = \frac{\Delta B_K}{\Delta P_K} \bigg/ \frac{\Delta I}{\Delta P_{ТЭНС}}. \quad (12)$$

При оптимизации совместной работы котельных и теплоэнергетических систем гелиоколлекторов можно произвести расчеты по выбросу CO_2 на котельных в результате сгорания топлива [5].

Использование отработанного карьера в качестве аккумулятора тепла. Расчет возможности использования водоема в отработанном карьере в качестве аккумулятора тепла для отопления в зимний период. Расчет температуры в теплоизолированном водоеме карьера основан на уравнении теплового баланса.

Тепло, полученное от системы солнечных коллекторов Q , расходуется на нагрев воды в аккумуляторе и на теплообмен с внешней средой через скальные породы в верхнюю теплоизолирующую оболочку:

$$dQ = c \cdot m \cdot dT + k \cdot (T - T_0) \cdot S \cdot dt, \quad (13)$$

где c – теплоемкость воды; m – масса воды в водоеме; k – средний коэффициент теплообмена с окружающей средой; T – мгновенная температура аккумулятора; T_0 – средняя температура окружающих горных пород; S – общая площадь поверхности аккумулятора.

Количество тепла, переданное от системы гелиоколлекторов аккумулятору [6]:

$$dQ = \eta \cdot P(t) \cdot S_k \cdot dt, \quad (14)$$

где η – общий коэффициент полезного действия, включающий КПД гелиоколлекторов и потери в трубопроводах; $P(t)$ – плотность потока прямой солнечной радиации (рассеянная радиация не учитывается, также как и облачность); S_k – площадь солнечных коллекторов.

Подставив (14) в (13) и разделив на dt , получим:

$$c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} + k \cdot S \cdot T - k \cdot S \cdot T_0 - \eta \cdot P(t) \cdot S_k = 0. \quad (15)$$

В период отопительного сезона к этому уравнению необходимо добавить мощность P_0 , которая отбирается в систему централизованного отопления, тогда уравнение (15) примет вид:

$$c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} + k \cdot S \cdot T - k \cdot S \cdot T_0 - \eta \cdot P(t) \cdot S_k + P_0 = 0. \quad (16)$$

Решение уравнения (16) в отопительный период (октябрь – апрель) и уравнения (15) для остального времени года дает возможность получить динамику температуры в аккумуляторе тепла и сделать вывод о работоспособности системы аккумулирования.

Для расчета модели аккумулятора приняты параметры, представленные в табл. 1.

Уравнения (15) и (16) решены с указанными в таблице значениями для срока, соответствующего пяти годам работы системы (рис. 1).

Таблица 1. Параметры для расчета модели аккумулятора

Параметр	Значение
Ширина водоема	300 м
Длина водоема	300 м
Средняя глубина	30 м
Общая масса воды	$2,7 \cdot 10^9$ кг
Общая площадь поверхности	$2,16 \cdot 10^5$ м ²
Средний коэффициент теплопередачи в грунт k	$8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
Температура окружающих пород T_0	15°С
Начальная температура аккумулятора	15°С
Обобщенный КПД гелиоколлекторов η	0,5
Общая площадь гелиоколлекторов S	10^5 м ²
Расход энергии из аккумулятора в зимнее время P_0	10 МВт

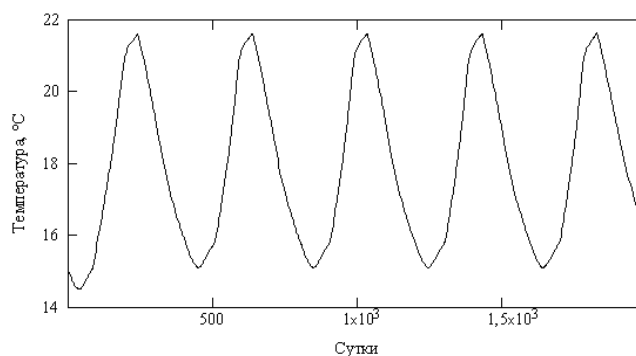


Рис. 1. Динамика температуры в аккумуляторе в течение пяти лет.

Из рис. 1 видно, что аккумулятор уже в первый год функционирования выходит на стационарный режим, при котором к концу лета устанавливается температура около 21,5°С. В результате уменьшения солнечного сияния и отбора тепла в отопительный период температура падает до 15°С. В связи с низким потенциалом тепла отбор в систему отопления возможен только с помощью теплового насоса, что приводит к существенному ухудшению энергетической эффективности системы.

Варианты улучшения эффективности возможны либо при хорошей теплоизоляции аккумулятора, либо при увеличении площади системы гелиоколлекторов. При уменьшении коэффициента теплоотдачи до $k = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ максимальная температура в аккумуляторе на третий год работы стабилизируется на отметке 31,5°С, что, впрочем, не отменяет использования теплового насоса (рис. 2).

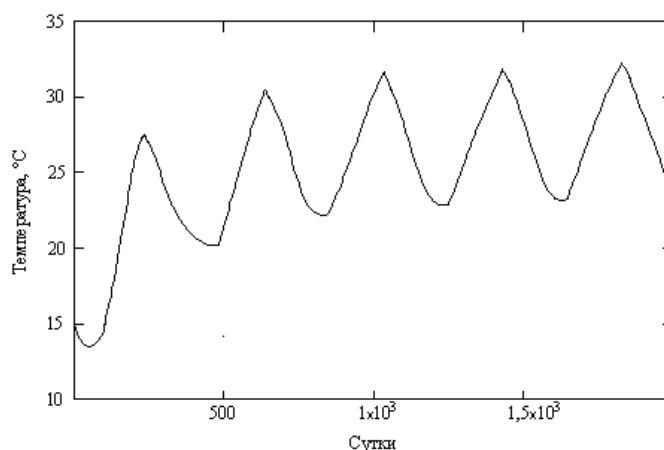


Рис. 2. Динамика температуры при улучшении теплоизоляции бака-аккумулятора.

Такого же ефекта можна досягнути при збільшенні вдвоє (до $2 \cdot 10^5 \text{ м}^2$) загальної площі геліоколекторів (рис. 3). В цьому випадку максимальна температура акумулятора становить приблизно 29°C з падінням взимку до більш низьких температур, ніж в разі покращення теплоізоляції.

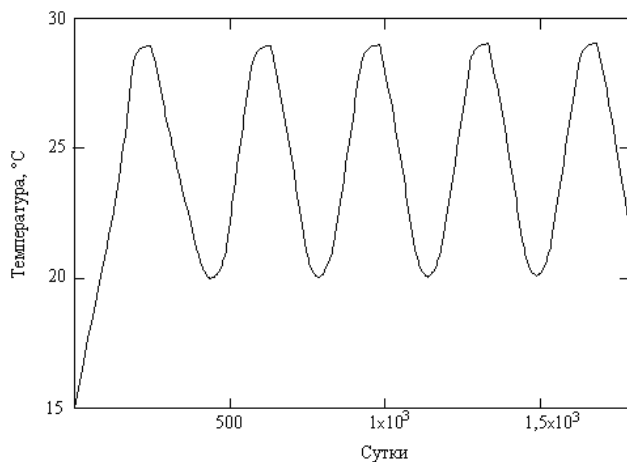


Рис. 3. Динаміка температури при збільшенні площі геліоколекторів.

Тільки при використанні обох методів покращення разом досягається значущий ефект (рис. 4). Температура в опалювальний сезон падає з 58°C до 47°C .

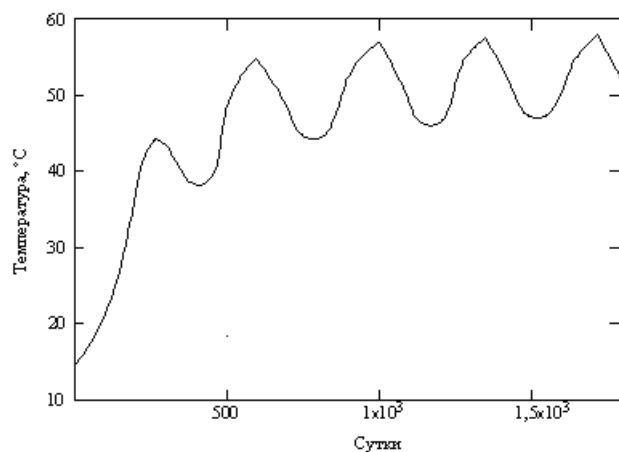


Рис. 4. Динаміка температури при покращенні теплоізоляції акумулятора та збільшенні площі геліоколекторів.

При використанні тільки вакуумних колекторів і трубопроводів з хорошою теплоізоляцією можна (за рахунок суттєвого удорожання проекту) досягти КПД близько 80%. Графік для цього випадку наведено на рис. 5. Максимальна температура 26°C говорить про те, що само по собі

підвищення КПД не дає значущого ефекта.

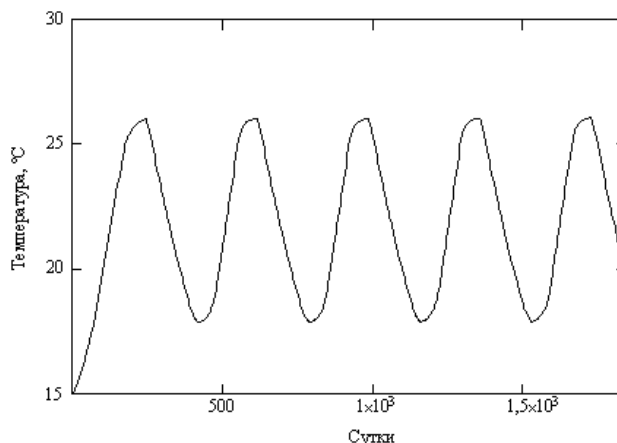


Рис. 5. Динаміка температури для випадку, коли КПД геліоколекторів дорівнює 80%.

Тільки застосування всіх трьох факторів одночасно дозволяє підняти температуру акумулятора вище 60°C , при якій використання теплового насоса не потрібно [7] (рис. 6).

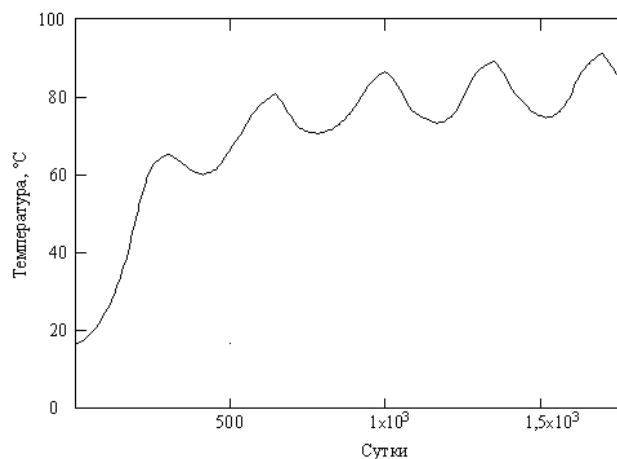


Рис. 6. Динаміка температури при використанні всіх способів оптимізації.

Из предложенных вариантов оптимизации наиболее затратной является теплоизоляция акумулятора, так как теплоизоляции подлежит не только верхняя поверхность, но также и дно водоема. При отказе от снижения коэффициента теплоотдачи требуется увеличение площади геліоколекторів. В результате моделирования установлено, что минимальная площадь геліоколекторів, при которой максимальная температура достигает 60°C , составляет $4 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ (рис. 7). Эта площадь в 4 раза превосходит площадь самого водного бассейна акумулятора.

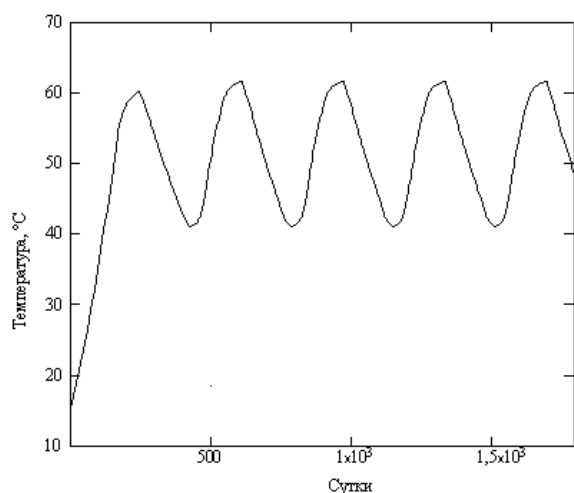


Рис. 7. Динаміка температури при площі геліоколекторів 400 тис. м².

Расчет эффективности аккумулятора. Рассмотрим систему, состоящую из гелиоколлекторов бассейна отработанного карьера, тепловых насосов и котельных г. Балаклавы.

Так как в реальных условиях теоретический коэффициент трансформации C примерно в два раза ниже, а с учетом того, что по мере охлаждения аккумулятора в период отопительного сезона эффективность теплового насоса будет снижаться, можно принять $C = 4$. Тогда при отборе 10 МВт тепла необходимо затратить 2,5 МВт мощности на работу самого теплового насоса.

Кроме того, необходимо затратить энергию на прокачку теплоносителя по системе солнечных коллекторов, если не используются коллекторы термосифонного типа.

Мощность, необходимая для прокачки по одной трубе коллектора, может быть определена по формуле:

$$P = q \cdot h \cdot \rho \cdot g, \quad (17)$$

где q – расход теплоносителя; h – высота подъема жидкости; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

Принимая $q = 0,02$ л/с, $h = 1,5$ м, находим, что для одной трубы коллектора мощность составит около 0,3 Вт. Если коллектор имеет эффективную площадь 1 м² и состоит из восьми труб, то затраты на 1 м² составят около 2,5 Вт. Таким образом, общая мощность, необходимая для прокачки теплоносителя, составит не менее 0,3 МВт. Так как отопительный сезон продолжается около полугода, а прокачивать необходимо

весь год, эффективные затраты мощности будут в два раза больше – 0,6 МВт.

Общая мощность на прокачку теплоносителя и отвод тепла, таким образом, составит:

$$2,5 \text{ МВт} + 0,6 \text{ МВт} = 3,1 \text{ МВт}.$$

Тогда полезная мощность равна:

$$10 \text{ МВт} - 3,1 \text{ МВт} = 6,9 \text{ МВт}.$$

При работе в течение отопительного сезона (6 месяцев) гелиосистема передает в систему отопления при мощности 6,9 МВт около 109 тыс. ГДж тепла.

Принимая удельную теплоту сгорания условного топлива равной 29,3 МДж/кг, получим, что количество тепла эквивалентно 3630 т условного топлива, что приводит к уменьшению выбросов до 90,75 т вредных веществ и уменьшает риск заболеваемости. Таким образом, экономия составляет 3630 т условного топлива в год.

Например, при цене дизельного топлива 1 \$/л экономия составит 3 млн 125 тыс. долларов.

Выводы. Анализ совместной работы котельных и теплоэнергетических систем гелиоколлекторов показывает, что использование теплоэнергетических систем гелиоколлекторов бассейна отработанного карьера, представляющего собой аккумулятор, позволяет экономить до 3630 тонн условного топлива, что приводит к снижению выбросов вредных веществ и уменьшает риск заболеваемости в курортной зоне Крыма.

1. Анисимов Н.Д. Расчеты и анализ режимов работы сетей / Н.Д. Анисимов, В.А. Веников, В.В. Ежков. – М.: Энергия, 1974. – 336 с.

2. Веников В.А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики / В.А. Веников, Э.Н. Зуев, И.В. Литкенс. – М.: Высшая школа, 1981. – 288 с.

3. Веников В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / В.А. Веников, В.Г. Журавлев, Т.А. Филиппова. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 464 с.

4. Веников В.А. Электрические системы. Электрические расчеты программирования и оптимизации режимов / В.А. Веников, В.И. Горушкин, И.М. Маркович и др. – М.: Высшая школа, 1973. – 320 с.

5. Ісаєнко В.М. Екологія та охорона навколишнього середовища / В.М. Ісаєнко, В.М. Криворотько, Г.М. Франчук. – Київ: Книжкове видавництво Національного авіаційного університету, 2005. – 192 с.

6. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир, 1977. – 420 с.

7. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Строительная климатология. – Киев: Минрегионбуд Украины, 2011. – 127 с.