

нювання дають можливість якісно визначити фізичні причини флуктуацій температури при геліосуші вологовмісних середовищ.

Висновки. 1. На основі застосування фундаментальної інтегральної теореми векторного аналізу про дивергенцію отримано звичайне диференціальне рівняння для середньооб'ємної температури вологовмісних середовищ при геліосуші з урахуванням конвективного переносу теплової енергії та фільтрації вологи.

2. Розроблено підхід до визначення параметрів усталеного стану та динаміки зміни середньої температури в часі з аналізом класичної теорії стійкості. Запропоновано методіку аналізу флуктуацій середньої температури внаслідок зміни потужності сонячного випромінювання, температури оточуючого середовища, а також термодинамічних характеристик, що визначають тепло-

обмін вологовмісних середовищ із оточуючим середовищем.

1. Лыков А.В. Теория сушки / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / пер. с англ. И.Г. Арамановича, А.М. Березмана, И.А. Вайнштейна, Л.З. Румшиского, Л.Я. Цлафа, под общей ред. И.Г. Арамановича. – Москва: Изд-во "Наука", 1973. – 832 с.
3. Кудря Т.С., Резцов В.Ф., Суржик Т.В. Анализ поглощаемой и запасаемой энергии солнечного излучения в средах на основе теоремы Умова-Пойнтинга в комплексной форме // Відновлювана енергетика. – 2007. – №1. – С. 34–37.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика / 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – Т. VI. – 736 с.
5. Баренблатт Г.И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1972. – 288 с.

УДК 697.7: 504.062

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

Обеспечение энергоснабжения с помощью гелиосистемы на базе отработанного карьера в качестве теплового аккумулятора

В работе анализируется возможность использования отработанного карьера для обеспечения теплоснабжения с помощью солнечных коллекторов, когда сам карьер используется как тепловой аккумулятор. Этот экологически чистый технологический процесс теплоснабжения улучшит климатическую обстановку и экологическую безопасность региона. Основной задачей является определение параметров эффективного режима эксплуатации гелиосистемы с теплоэнергетической и экологической точки зрения.

Ключевые слова: теплоснабжение, солнечный коллектор, гелиосистема, тепловой аккумулятор, отработанный карьер, экологическая безопасность.

У роботі аналізується можливість використання відпрацьованого кар'єру для забезпечення теплопостачання за допомогою сонячних колекторів, коли сам кар'єр використовується у якості теплового акумулятора. Цей екологічно чистий технологічний процес теплопостачання поліпшить кліматичну обстановку і екологічну безпеку регіону. Основним завданням є визначення параметрів ефективного режиму експлуатації геліосистеми з теплоенергетичної та екологічної точки зору.

Ключові слова: теплопостачання, сонячний колектор, геліосистема, тепловий акумулятор, відпрацьований кар'єр, екологічна безпека.

Введение. Обеспечение экологической безопасности – один из важнейших аспектов развития современного общества. При увеличении темпов выработки тепловой и электрической энергии и различного рода производства пропорционально

увеличиваются выбросы вредных веществ в окружающую среду. К таким веществам относятся твердые частицы, такие как пыль и зола, оксиды серы (SO₂ и SO₃), оксиды азота (NO, NO₂), оксиды углерода (CO, CO₂), углеводороды (C_xH_y). На

© Э.А.Бекиров, С.Н.Воскресенская, М.М.Асанов, 2014

атомных электростанциях газвые выбросы содержат радиоактивные изотопы различных элементов.

Наиболее благоприятен для дыхания атмосферный воздух, содержащий азота – 78,08%, кислорода – 20,95%, инертных газов – 0,93%, углекислого газа – 0,03%, прочих газов – 0,01%. Выбрасываемые в атмосферу вредные вещества могут существенно изменить его состав, что повлечет неблагоприятные последствия для здоровья людей и климата в целом. Например, пары и газы образуют с воздухом смеси, а твердые и жидкие частицы – аэрозоли, способные долго существовать в виде пыли, дыма или тумана. Для контроля количества вредных веществ был введен специальный параметр – предельно допустимая концентрация (ПДК). При их одновременном содержании в воздухе и однонаправленном действии отношения фактических концентраций к ПДК не должны превышать 1:

$$\frac{K_1}{ПДК_1} + \frac{K_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{K_n}{ПДК_n} \leq 1, \quad (1)$$

где K_1, K_2, \dots, K_n – фактические концентрации вредных веществ в воздухе, мг/м^3 ; $ПДК_1, ПДК_2, \dots, ПДК_n$ – предельно допустимые концентрации, мг/м^3 . ПДК указываются в нормативных документах (ГОСТ 12.1.005-88, СанПиН 2.1.6.1032-01).

Экологическая безопасность особенно важна для курортных зон, к которым относится, в том числе, и Крым. Рекреационные объекты необходимо обеспечивать не только электрической энергией, но и теплом в холодное время года. Традиционные системы энергоснабжения, работающие на угле, газе или мазуте, могут не только создать эстетический диссонанс, но также привести к ухудшению климатической обстановки, здоровья отдыхающих.

Анализ публикаций. В настоящий момент проводятся многочисленные исследования и мониторинг состояния окружающей среды. Изучаются различные факторы влияния и оказываемые ими негативные последствия при осуществлении производственных процессов и генерации энергии. Данные вопросы рассматриваются, например, в источниках [1–7].

На различного рода тепло- и электростанциях с помощью использования электрофильтров можно уменьшить количество выбрасываемых вредных веществ. Альтернативным способом, полностью исключая возникновение вредных экологических факторов, является использование возобновляемых источников энергии, например, солнечного излучения. Гелиосистемами можно заменить котельные, работающие на традиционных видах топлива. При этом возникнет проблема размещения оборудования, так как оно может занять значительные площади при больших обеспечиваемых мощностях. Одним из возможных решений является использование отработанных карьеров. Дополнительным преимуществом можно считать то, что их можно использовать в качестве тепловых аккумуляторов.

Цель и постановка задачи. Целью работы является определение параметров и характеристик при использовании отработанного карьера для обеспечения теплоснабжения с помощью солнечных коллекторов, когда сам карьер используется как тепловой аккумулятор. Основной задачей является выявление эффективного режима эксплуатации с теплоэнергетической и экологической точки зрения.

Результаты и их анализ. Рассмотрим использование отработанного карьера в качестве аккумулятора. Для его функционирования необходимо создать специальные условия, чтобы придонный слой запасал тепловую энергию, и не возникало тепловой конвекции. Для создания подобного рода условий используют соль: соленая вода размещается внизу, а сверху – слой пресной воды, используемый в качестве своеобразной изоляции. По бокам карьера располагаются плоские солнечные коллекторы, а сверху на специальном изолирующем устройстве – фокусирующие. С помощью циркуляционных насосов теплоноситель (пропиленгликоль) прокачивается через трубки коллекторов, где нагревается и подается обратно в бассейн. В придонном слое происходит теплообмен между пропиленгликолем и соленой водой. Для этого используется теплообменная поверхность, состоящая из ряда параллельных горизонтальных трубок. В случае необходимости соленая вода может быть

прокачана через теплообменник отопительной системы, где нагревается вода, подаваемая по магистральным трубопроводам потребителю. На рис. 1 показана схема аккумулятора тепла на базе отработанного карьера, работающая по вышеописанному принципу, а на рис. 2 – схема циркуляции пропиленгликоля.

При рассмотрении принципа работы теплового аккумулятора можно выявить, что одновременно будет происходить два процесса теплообмена:

1. Соленая вода отбирает тепло у пропиленгликоля и нагревается.
2. Соленая вода отдает тепло теплоносителю системы отопления и остывает.

Процессы протекают со скоростью V_1 и V_2 соответственно, при этом передается количество теплоты h_1 и h_2 . Поэтому простым анализом невозможно однозначно выявить изменения параметров теплового режима бассейна отработанного карьера. На них будут влиять интенсивность солнечной радиации, падающей на плоские и

фокусирующие солнечные коллекторы, а также на изолирующее устройство над пресной водой карьера, температура и материал грунта, окружающего бассейн. Перечисленные параметры можно назвать внешними исходными воздействиями. Они будут влиять на переменные, описывающие состояние системы отопления и являющиеся основной целью расчетов – выходные параметры. Соответственно можно выявить и такие переменные, которые характеризуют промежуточные состояния процессов теплообмена. Множество таких значений обозначим X_1, X_2, \dots, X_n , то есть, вектор состояний задается совокупностью $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Такое разграничение переменных позволяет рассматривать процессы теплообмена как блок преобразований с определенными количествами входных и выходных величин. При использовании пространства переменных состояния [8] для упрощения анализа можно принять наличие одного обобщенного входа и выхода.

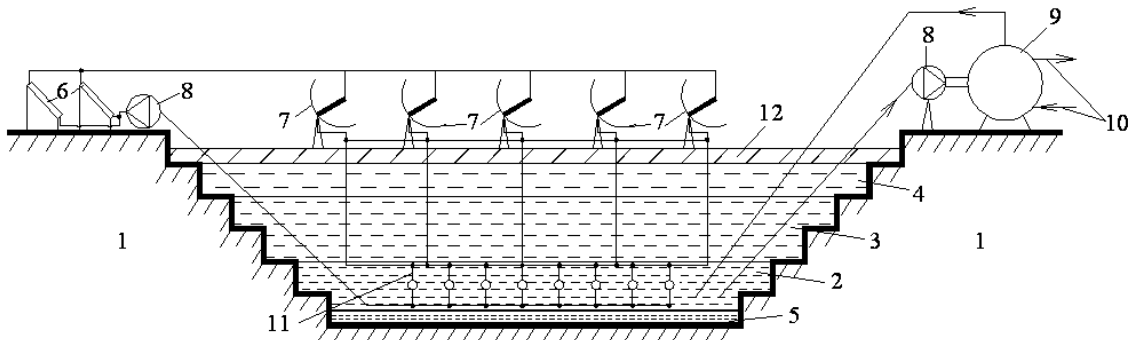


Рис. 1. Общая схема аккумулятора тепла на базе отработанного карьера: 1 – платформы, изолирующие наружную поверхность аккумулятора; 2 – слой воды с соленостью 200-250 ‰; 3 – слой воды с соленостью 30-150 ‰; 4 – пресная вода; 5 – гидроизоляция; 6 – плоские солнечные коллекторы; 7 – фокусирующие коллекторы; 8 – циркуляционные насосы; 9 – теплообменник системы отопления; 10 – магистральные трубопроводы; 11 – теплообменная поверхность гелиосистемы для передачи тепловой энергии соленой воде; 12 – специальное изолирующее устройство.

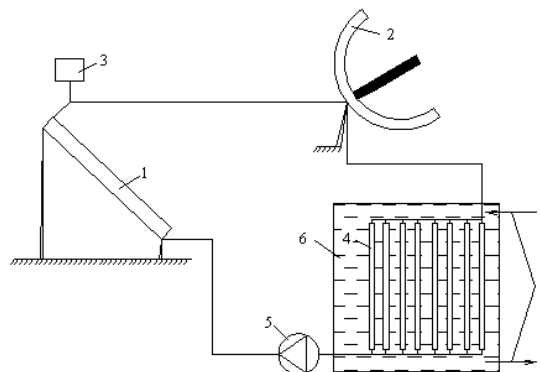


Рис. 2. Схема контура нагрева теплоносителя: 1 – плоские солнечные коллекторы; 2 – фокусирующие коллекторы; 3 – расширительный бак; 4 – теплообменная поверхность, состоящая из ряда параллельных горизонтальных трубок и расположенная в придонном слое карьера; 5 – циркуляционный насос; 6 – соленая вода на дне карьера; 7 – трубки, ведущие к теплообменнику отопительной системы.

Обозначим как переменные состояния x_1 , x_2 и x_3 весовые доли компонентов исходного состояния солевого раствора, промежуточного после нагрева с помощью гелиосистемы и результирующего после передачи тепла воде системы отопления. Так как процесс преобразования параметров является замкнутым, то он будет характеризоваться уравнением $x_1+x_2+x_3=1$, исключая вмешательство неучтенных факторов. Переменные x_1 , x_3 характеризуют температуру в соответствующем состоянии. Процесс теплообмена (промежуточное состояние) описывается переменной τ – это температура, зависящая от количества теплоты, выделяемой в бассейне в результате воздействия суммарной солнечной радиации. Для упрощения расчетов принимаем, что теплоемкость c , плотность ρ и молекулярный вес соляного раствора не изменяется. Скорость теплообмена бассейна C является результатом влияния скоростей нагрева V_1 и охлаждения V_2 соленой воды, а также ее температуры в начальный и конечный момент времени τ_1 и τ_2 . Скорости теплообмена могут быть представлены как экспоненциальные функции:

$$\begin{aligned} v_1 &= x_1 \exp \frac{\lambda_1 - \beta_1}{\tau}, \\ v_2 &= x_2 \exp \frac{\lambda_2 - \beta_2}{\tau}, \end{aligned} \tag{2}$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \beta_1, \beta_2$ – константы.

Тогда процессы изменения входных и результирующих величин, а также теплообмена, можно описать системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= V_1 - (V_1 - V_2 - v_1)x_1, \\ \frac{dx_3}{dt} &= v_1(1 - x_1 - x_3) - (V_1 + V_2)x_3, \\ \frac{d\tau}{dt} &= h_1 v_1 x_1 + h_2 v_2 (1 - x_1 - x_3) + \\ &+ V_1(\tau_1 - \tau) + V_2(\tau_2 - \tau) + C. \end{aligned} \tag{3}$$

Если обозначить вектор переменных состояния $x = (x_1, x_3, \tau)$, а вектор воздействия – $V = (V_1, V_2, \tau_1, \tau_2)$, то нелинейное уравнение мож-

но записать в матричной форме через вектор-функцию:

$$\frac{dx}{dt} = \int(x, V, t). \tag{4}$$

Так как результирующие состояния y рассматриваемой системы однозначно определяются оказанными на нее входными управляющими воздействиями V , то зависимость процесса теплообмена от времени t можно описать матричными уравнениями:

$$\frac{dx(t)}{dt} = F[x(t), V(t)], \tag{5}$$

$$y(t) = \gamma[x(t), V(t)]. \tag{6}$$

Уравнение (5) характеризует состояние системы, поэтому, если известны значения, задающие начальные условия $x_0 = x(t_0)$ для бассейна карьера, его можно преобразовать в вектор состояния:

$$x(t) = \psi[x(t_0), V(t)]. \tag{7}$$

Уравнение (6) определяет выходные переменные в зависимости от $x(t)$ и $V(t)$, поэтому называется выходным.

Для линейных систем имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A(t)x(t) + B(t)V(t), \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)V(t), \end{aligned} \tag{8}$$

где $A(t)$ – матрица системы; $B(t)$ – матрица управления; $C(t)$ – матрица выхода; $D(t)$ – матрица входа.

Если элементы этих матриц зависят от времени, то система будет линейной нестационарной или параметрической. Для линейных стационарных систем элементы матриц A, B, C, D выражаются постоянными числами, которые являются функциями параметров компонент системы.

Рассмотрим процессы, протекающие в гидравлическом контуре солнечных коллекторов с естественной циркуляцией. Для этого запишем в общем виде уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0. \tag{9}$$

При стационарном распределении температуры в трубках коллекторов $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, следовательно:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0. \quad (10)$$

При одномерном движении жидкости уравнение (10) принимает вид:

$$\frac{d}{dx}(\rho v) = \rho \frac{dv}{dx} + v \frac{d\rho}{dx} = 0. \quad (11)$$

Следовательно

$$\rho dv + v d\rho = 0. \quad (12)$$

Разделив уравнение (12) на произведение ρv и интегрируя, получим:

$$\int \frac{dv}{v} + \int \frac{d\rho}{\rho} = 0. \quad (13)$$

Таким образом

$$\ln v + \ln \rho = \ln(\rho v) = \text{const}, \quad (14)$$

откуда плотность потока жидкости равна:

$$J = \rho v = \text{const}. \quad (15)$$

Для составления уравнения баланса энергии рассмотрим элемент жидкости в коллекторе длиной dx . Этот элемент за время dt поглощает количество энергии:

$$dQ = P_0 \cdot d \cdot dx dt, \quad (16)$$

где P_0 – плотность падающего солнечного излучения; d – диаметр участка трубопровода.

Поглотив это количество энергии, элемент жидкости получает приращение температуры $d\tau$, определяемое выражением:

$$dQ = c \cdot dm \cdot d\tau = c \cdot \rho(\tau) \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot dx \cdot d\tau, \quad (17)$$

где dm – масса жидкости выбранного элемента коллектора длиной dx .

Приравнявая (16) и (17), получим:

$$P_0 d \cdot dx dt = c \cdot \rho(\tau) \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot dx \cdot d\tau. \quad (18)$$

Если учесть, что $dt = \frac{dx}{v}$, то из уравнения

(18) можно выразить градиент температуры в трубке коллектора:

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{4 \cdot P_0}{\pi \cdot c \cdot d \cdot \rho(\tau) \cdot v}. \quad (19)$$

Если учесть выражение (15), то можно сделать вывод, что градиент температуры является постоянной величиной. Поэтому при интегрировании (19) получим закон изменения температуры в трубке коллектора:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau = \int_0^L \frac{4 \cdot P_0}{\pi \cdot c \cdot d \cdot \rho(\tau) \cdot v} dx, \quad (20)$$

где τ_1 – температура на входе в трубку коллектора; τ_2 – температура на выходе из трубки; L – длина трубки коллектора.

Таким образом, из уравнения (20) можно найти τ_2 :

$$\tau_2 = \tau_1 + \frac{4 \cdot P_0 \cdot L}{\pi \cdot c \cdot d \cdot J}. \quad (21)$$

Уравнение (21) показывает, что возрастание температуры вдоль трубки коллектора является линейным. В общем случае, интегрируя (20) до некоторой точки с произвольной координатой x , получим:

$$\tau(x) = \tau_1 + \frac{4 \cdot P_0}{\pi \cdot c \cdot d \cdot J} \cdot x. \quad (22)$$

Если проанализировать уравнение (22), то видно, что графиком зависимости температуры от длины трубки коллектора будет прямая линия с тангенсом угла наклона к оси абсцисс, равным ко-

эффициенту $K = \frac{4 \cdot P_0}{\pi \cdot c \cdot d \cdot J}$ перед переменной x :

$$\tau(x) = \tau_1 + K \cdot x. \quad (23)$$

Из выражений (15), (22) и (23) следует, что величина коэффициента $K = \frac{d\tau}{dx}$ будет величиной постоянной.

Движение жидкости сопровождается потерями напора, вследствие чего давление по длине трубы изменяется: $\Delta p_{\text{зидр}}$. Закономерность движения реальной жидкости может быть описана уравнением движения, представляющим собой второй закон Ньютона. Для одномерного потока вязкой жидкости оно может быть записано в виде [8]:

$$\rho \frac{d \cdot v}{dt} = \rho g \cdot \sin \alpha - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \Delta p_{\text{зидр}}}{\partial x}. \quad (24)$$

Левая часть уравнения выражает произведение массы элемента жидкости на ускорение, правая – сумму сил, действующих на элемент жидкости: сила тяжести, давления и гидравлических сопротивлений движению. Для одномерного потока жидкости субстанциональная производная имеет вид [9]:

$$\frac{d \cdot v}{dt} = \frac{dv}{dt} + v \frac{dv}{dx}. \quad (25)$$

При стационарном течении $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ и уравнение (24) переписывается в виде:

$$\rho v \frac{dv}{dx} = \rho g \cdot \sin \alpha - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \Delta p_{\text{зупр}}}{\partial x}. \quad (26)$$

Отсюда давление равно:

$$dp = \rho g \cdot \sin \alpha \cdot dx + \frac{\partial \Delta p_{\text{зупр}}}{\partial x} \cdot dx - \rho v \cdot dv. \quad (27)$$

Интегрируя (27) на участке гидравлического контура длиной L , получим:

$$\Delta p = g \cdot \sin \alpha \int_0^L \rho(x) \cdot dx + \int_0^L \frac{\partial \Delta p_{\text{зупр}}}{\partial x} \cdot dx - \int_{v_1}^{v_2} \rho(\tau) \cdot v \cdot dv. \quad (28)$$

Потери на трение для случая изотермического потока определяются выражением [10]:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \xi_0 \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho(\tau_1) \cdot v^2}{2}, \quad (29)$$

где ξ_0 – коэффициент трения, определяющийся выражением: $\xi_0 = \frac{64}{\text{Re}}$.

Так как число Рейнольдса $\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu}$, где ν – кинематическая вязкость жидкости, то для ξ_0 получим:

$$\xi_0 = \frac{64 \cdot \nu}{v \cdot d}. \quad (30)$$

Тогда уравнение (29) примет вид:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \frac{32 \cdot \mu(\tau_1) \cdot v \cdot L}{d^2}, \quad (31)$$

где $\mu(\tau_1) = \rho(\tau_1) \cdot \nu(\tau_1)$ – динамическая вязкость жидкости при температуре τ_1 в опускной трубе.

Согласно [10], коэффициент трения в повороте $\xi = \xi_0 \cdot B \cdot C$, где величины ξ_0 , B , и C определяются по графикам, полученным на основании обработки экспериментальных данных. По графикам, приведенным в [10], $\xi_0 = 0,9$, $B = 1,4$, $C = 1$ (для трубы круглого сечения). Тогда общий коэффициент трения равен: $\xi = 0,9 \cdot 1,4 = 1,26$. Таким образом, потери на трение в повороте равны:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{пов}} &= 1,26 \cdot \frac{L \cdot \rho(\tau_1) \cdot v^2}{2 \cdot d} = \\ &= 0,63 \cdot \frac{L \cdot \rho(\tau_1) \cdot v^2}{d}. \end{aligned} \quad (32)$$

Функцию скорости $v(\tau)$ представим через скорость на входе в трубу коллектора v_1 с помощью уравнения непрерывности: $\rho(\tau) \cdot v(\tau) = \rho(\tau_1) \cdot v_1$, откуда

$$v(\tau) = v_1 \cdot \frac{\rho(\tau_1)}{\rho(\tau)} = \frac{J}{\rho(\tau)}. \quad (33)$$

Потери давления на трение в трубе коллектора:

$$\Delta p_{\text{зупр}} = \frac{J}{2 \cdot d \cdot K} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \xi(\tau) \cdot v(\tau) \cdot d\tau. \quad (34)$$

Подставив (33) в (34), получим:

$$\Delta p_{\text{зупр}} = \frac{J^2}{2 \cdot d \cdot K} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\xi(\tau)}{\rho(\tau)} \cdot d\tau. \quad (35)$$

Согласно [10], зависимость коэффициента трения $\xi(\tau)$ от температуры при ламинарном движении жидкости имеет вид:

$$\xi(\tau) = \xi_0 \cdot \left(\frac{\mu(\tau)}{\mu(\tau_1)} \right)^{n(\tau)}, \quad (36)$$

где $n(\tau)$ – показатель степени, который определяется по выражению [10]:

$$n(\tau) = 2,3 \cdot \left(\text{Re} \cdot \frac{d}{L} \right)^{-0,3} \cdot \left(\frac{\mu(\tau)}{\mu(\tau_1)} \right)^{-0,62}, \quad (37)$$

где $\text{Re} = \frac{v(\tau) \cdot L}{a(\tau)}$ – число Пекле; a – теплопроводность жидкости.

С учетом (33) уравнение (37) принимает вид:

$$n(\tau) = 2,3 \cdot \left(\frac{d \cdot J}{a(\tau) \cdot \rho(\tau)} \right)^{-0,3} \cdot \left(\frac{\mu(\tau)}{\mu(\tau_1)} \right)^{-0,62}. \quad (38)$$

Потери давления, связанные с ускорением жидкости, определяются с помощью выражения:

$$\Delta p_{\text{уск}} = - \int_{v_1}^{v_2} \rho(\tau) \cdot v(\tau) \cdot dv = 0. \quad (39)$$

Учитывая, что плотность потока $J = \text{const}$, получим:

$$\Delta p_{\text{уск}} = - \int_{v_1}^{v_2} J \cdot dv = -J \cdot (v_2 - v_1). \quad (40)$$

Исключая v_2 с помощью (33), получим:

$$\Delta p_{\text{уск}} = -J \cdot v_1 \cdot \left(\frac{\rho(\tau_1)}{\rho(\tau_2)} - 1 \right). \quad (41)$$

Гидростатическое давление в трубке коллектора:

$$\Delta p_{\text{гид}} = g \cdot \sin \alpha \int_0^L \rho(\tau) \cdot dx = \frac{g \cdot \sin \alpha}{K} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \rho(\tau) \cdot d\tau. \quad (42)$$

Уравнение (28) для трубки коллектора с учетом всех видов потерь давления (выражения (35), (41) и (42)) примет вид:

$$\Delta p_k = \frac{J^2}{2 \cdot d \cdot K} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\xi(\tau)}{\rho(\tau)} \cdot d\tau - J \cdot v_1 \cdot \left(\frac{\rho(\tau_1)}{\rho(\tau_2)} - 1 \right) + \frac{g \cdot \sin \alpha}{K} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \rho(\tau) \cdot d\tau. \quad (43)$$

Таким образом, система уравнений, определяющая режим естественной циркуляции в коллекторе с гидродинамическим контуром, имеет вид:

$$\begin{aligned} & \rho(\tau_1) g \cdot L \cdot \sin \alpha + \frac{32 \cdot \mu(\tau_1) \cdot v_1 \cdot L}{d^2} + \\ & + 0,63 \cdot \frac{L \cdot \rho(\tau_1) \cdot v_1^2}{d} = \frac{J^2}{2 \cdot d \cdot K} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\xi(\tau)}{\rho(\tau)} d\tau - \\ & - J \cdot v_1 \cdot \left(\frac{\rho(\tau_1)}{\rho(\tau_2)} - 1 \right) + \frac{g \cdot \sin \alpha}{K} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \rho(\tau) \cdot d\tau, \\ & \tau_2 = \tau_1 + \frac{4 \cdot P_0 \cdot L}{\pi \cdot c \cdot d \cdot J}. \end{aligned} \quad (44)$$

Решение этой системы при известных значениях $P_0, d, L, \alpha, \tau_1, c$ и параметрах жидкости как функции температуры $\rho(\tau), \nu(\tau), \mu(\tau), a(\tau)$ позволяет определить обе неизвестных – v_1 и τ_2 . Это дает возможность определить поток жидкости в трубе коллектора и поток энергии, переносимый в бак-аккумулятор. Для отработанного карьера аккумулялирование осуществляется в самом бассейне. При наличии циркуляционных насосов производительность увеличится в m раз за счет увеличения напора жидкости.

Рассмотрим числовой пример расчета согласно уравнению (44). Исходные данные приведены в таблице 1. По ним были рассчитаны функциональные зависимости от температуры (таблица 2).

Таблица 1. Исходные данные для расчета параметров гелиосистемы

№	Параметр	Значение
1	Теплоемкость воды	$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
2	Диаметр трубок коллектора	$d = 0,03 \text{ м}$
3	Длина труб коллектора	$L = 2 \text{ м}$
4	Угол наклона коллектора к горизонту	$\beta = 45^\circ$
5	Температура воды в аккумуляторе	$\tau_1 = 20^\circ \text{C} = 293 \text{ К}$

Таблица 2. Функциональные зависимости параметров $\rho(\tau), \nu(\tau), \mu(\tau), a(\tau)$ от температуры

№	Параметр	Функциональная зависимость от температуры
1	Плотность	$\rho(\tau) = \frac{995,7}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3} \cdot (\tau - 273)}$
2	Коэффициент кинематической вязкости	$\nu(\tau) = \frac{1,78 \cdot 10^6}{1 + 0,0337 \cdot (\tau - 273) + 0,00022 \cdot (\tau - 273)^2}$
3	Коэффициент динамической вязкости	$\mu(\tau) = \rho(\tau) \cdot \nu(\tau)$
4	Коэффициент температуропроводности	$a(\tau) = 1,32 \cdot 10^{-7} \cdot [1 + 0,003 \cdot (\tau - 273)]$

На рис. 3 [11] показана зависимость скорости потока жидкости в опускной трубе и на входе в трубку коллектора в зависимости от температуры в баке-аккумуляторе. Из графика видно, что по мере увеличения температуры возрастает и скорость циркуляции теплоносителя. Это обусловлено уменьшением гидравлического сопротивления потоку жидкости и увеличением разности статических давлений в обратной трубе и трубке коллектора, которое, в свою очередь, связано с увеличением скорости падения плотности с ростом температуры. Эта разность статических давлений представляет собой движущее давление, возникающее вследствие разных масс жидкости в опускной трубе и трубке коллектора.

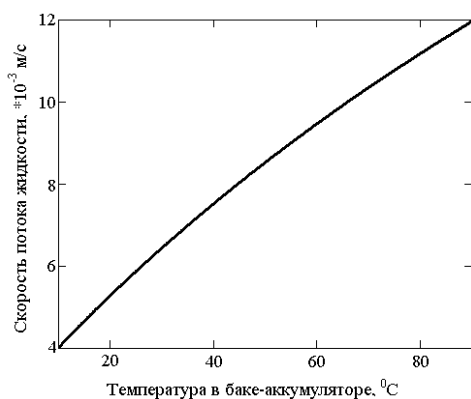


Рис. 3. Зависимость скорости потока жидкости на входе в трубку коллектора от температуры в баке-аккумуляторе.

Зависимость потока жидкости от плотности поглощенной солнечной энергии P_0 может существенно меняться в течение светового дня: чем больше P_0 , тем быстрее будет перемещаться теплоноситель. Температура воды в аккумуляторе также может возрастать при увеличении освещенности. Это связано с уменьшением трения в коллекторе и ростом движущего давления с температурой.

Выводы. Снабжение потребителей тепловой энергией можно обеспечить за счет использования экологически чистых технологических процессов, таких как нагрев воды с помощью гелиосистемы и аккумулятирование тепловой энергии в бассейне отработанного карьера. Для рекреационных территорий такое решение позволяет решить вопрос с размещением генерирующих мощностей и выбросами вредных веществ в атмосферу.

Если одновременно будет происходить процесс нагрева соленой воды в бассейне и отбор тепла в систему отопления, то необходимо использовать метод пространства переменных состояний, чтобы найти параметры, характеризующие процессы теплообмена. Существенное влияние оказывает плотность потока падающего солнечного излучения. Она влияет как на скорость перемещения теплоносителя, так и на значение температуры, которую можно получить в аккумуляторе.

1. *Волынкина Е.П.* Снижение выбросов загрязняющих веществ на угольных котельных со слоевой системой сжигания / *Е.П. Волынкина, Е.В. Пряничников* // Теплоэнергетика. – 2002. – №2. – С. 33–41.
2. *Жаров В.А.* Экологическая оценка территории бывшей Щелкинской АЭС на этапе проектирования новых энергообъектов традиционной и возобновляемой энергетики / *В.А. Жаров, С.П. Муровский, С.В. Варавин* // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов. – Симферополь: НАПКС, 2013. – Вып. 45. – С. 131–136.
3. *Зеркалов Д.В.* Экологическая безопасность. Учебное пособие / *Д.В. Зеркалов*. – К.: Основа, 2009. – 513 с.
4. *Котлер В.Р.* Технологии одновременного снижения выбросов NOx и SO2 на пылеугольных котлах ТЭС США / *В.Р. Котлер* // Теплоэнергетика. – 2002. – №1. – С. 72–75.
5. *Муровский С.П.* Экологическая эффективность внедрения больших гелиоустановок на рекреационных территориях южного берега Крыма / *С.П. Муровский, Н.А. Сологуб, А.С. Муровская* // Наукові праці ДонНТУ, Серія "Гірнично-геологічна". – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – № 15. – С. 326–332.
6. *Саламов А.А.* Опыт некоторых энергетических компаний США и центральной Европы по защите окружающей среды / *А.А. Саламов* // Теплоэнергетика. – 2002. – №2. – С. 76–78.
7. *Требуных С.А.* Снижение выбросов вредных веществ от котельных установок за счет оптимизации режимных параметров: автореферат дис. на соискание науч. степени канд. тех. наук: спец. 05.14.14 "Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты" / *Требуных С.А.* – Чита, 2006. – 20 с.
8. *Стырикович М.А.* Котельные агрегаты / *М.А. Стырикович, К.Я. Катковская, Е.П. Серов*. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 488 с.
9. *Биркгоф Г.* Гидродинамика / *Г. Биркгоф*. – М.: Иностранная литература, 1963. – 244 с.
10. *Кутателадзе С.С.* Справочник по теплопередаче / *С.С. Кутателадзе, В.М. Боршанский*. – Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 414 с.
11. *Бекиров Э.А.* Алгоритм расчета и анализ естественной циркуляции в солнечном коллекторе / *Э.А. Бекиров, Д.В. Каркач* // Відновлювана енергетика. – 2013. – №1. – С. 21–28.