

УДК 621.311.22

Баласаян Г.А.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОГЕНЕРАЦИИ С ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРОМ

Одним из путей повышения эффективности использования органического топлива является внедрение современных энергосберегающих когенерационных технологий для обеспечения потребностей промышленного и коммунального секторов [1].

Решить задачу повышения эффективности когенерационных технологий и конкурентоспособности систем альтернативного теплоснабжения возможно за счет внедрения интегрированных систем энергообеспечения (ИСЭ), сочетающих когенерационные установки (КУ) малой мощности и дополнительные (альтернативные) источники тепла, которые, благодаря своим природным особенностям, способны снять ограничения, присущие в отдельности каждой системе [2].

Для покрытия пиковых тепловых нагрузок в неотапительный период, особенно для южных регионов Украины, предлагается использовать интегрированную систему энергоснабжения (рис. 1), которая включает в себя КУ на базе газопоршневого двигателя-генератора (ГДГ) и гелиоколлектор (ГК) соответствующей площади с двумя баками-аккумуляторами – для отдельного аккумулирования тепла гелиосистемой (бак № 1) и когенерационной установкой, с последующим сливом нагретой за день воды в бак-аккумулятор когенерационной установки (бак № 2) [3].

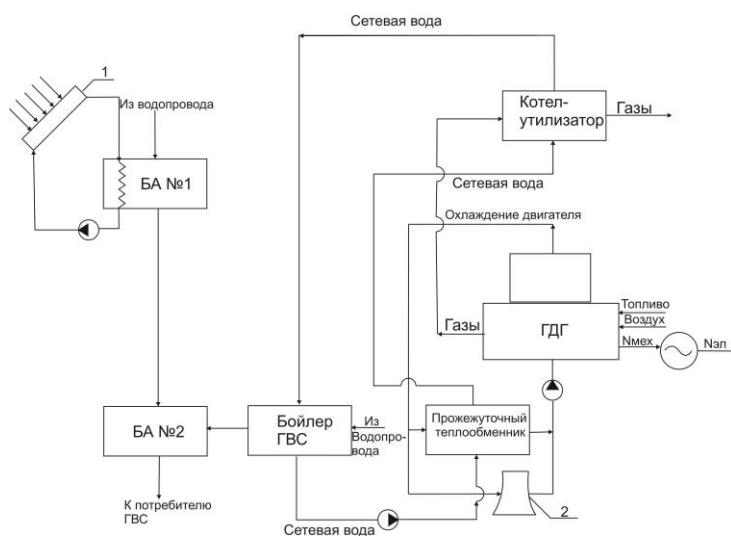


Рисунок 1 – Интегрированная система энергоснабжения на базе установки когенерации малой мощности и гелиоколлектора  
1 – гелиоколлектор; 2 – градирня

При моделировании режимов работы ИСЭ необходимо учитывать большое количество определяющих параметров, которые изменяются во времени, поэтому возникает необходимость проведения большого количества усреднений указанных параметров с целью получения зависимостей, позволяющих получить решение системы уравнений.

Кроме того, при математическом описании режимов работы системы необходимо ввести ряд допущений:

- процессы теплообмена, происходящие в основных элементах ИСЭ, описываются линейными дифференциальными уравнениями и зависят от запаса тепла в аккумуляторе, который является переменной величиной во времени;
- коэффициент использования тепла для теплообменных аппаратов равен 1;
- потерями тепла в трубопроводах можно пренебречь.

Причем, учитывая природу источников энергии, для БА № 1 используется принцип аккумуляирования при постоянном объеме теплоносителя в нем ( $V_{\hat{A}\hat{E}1} = \text{const}$ ), но при переменной температуре ( $t_{\hat{A}\hat{E}1} = \text{var}$ ), а для БА № 2 – наоборот, температура теплоносителя относительно постоянна, а его объем – переменная величина ( $t_{\hat{A}\hat{E}2} = \text{const}$ ,  $V_{\hat{A}\hat{E}2} = \text{var}$ ).

С учетом указанных допущений, тепловой поток, который поступает от гелиоколлектора  $Q_{\hat{a}\hat{e}}$  в произвольный момент времени  $\tau$ , равен тепловому потоку, который поступает в тот же момент времени в БА № 1  $Q_{\hat{A}\hat{A}1}^{\hat{a}\hat{o}}$ , т.е. справедливо равенство:

$$Q_{\hat{A}\hat{A}1}^{\hat{a}\hat{o}} [t_{\hat{A}\hat{E}1}(\tau), \tau] = Q_{\hat{a}\hat{e}} [t_{\hat{A}\hat{E}1}(\tau), \tau].$$

Тепловой поток утилизированного тепла на выходе когенерационной установки  $Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}$  равен сумме тепловых потоков, поступающих в систему горячего водоснабжения (ГВС)  $Q_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}}^{\hat{a}\hat{o}}$ , в БА № 2  $Q_{\hat{A}\hat{A}2}^{\hat{a}\hat{o}}$ , и тепловому потоку на входе в когенерационную установку  $Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{o}}$ , т.е. можно записать равенство:

$$Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}(\tau) = Q_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau) + Q_{\hat{A}\hat{A}2}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau) + Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau).$$

Тепловой поток, который поступает к потребителю ГВС в произвольный момент времени  $\tau$ , равен сумме тепловых потоков системы ГВС  $Q_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}}^{\hat{a}\hat{o}}$  и тепловому потоку на выходе из БА № 2  $Q_{\hat{A}\hat{A}2}^{\hat{a}\hat{o}}$ :

$$Q_{i\hat{i}\hat{o}\hat{o}}(\tau) = Q_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau) + Q_{\hat{A}\hat{A}2}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau).$$

С учетом приведенных отношений можно представить уравнения энергетического баланса соответственно для БА № 1 и БА № 2 в виде:

$$\begin{aligned} (V_{\hat{A}\hat{E}1} \cdot \rho_{\hat{o}} \cdot c_{\hat{o}}) \cdot \frac{dt_{\hat{A}\hat{E}1}(\tau)}{d\tau} &= Q_{\hat{a}\hat{e}} [t_{\hat{A}\hat{E}1}(\tau), \tau] - Q_{i\hat{i}\hat{o}}(\tau); \\ (t_{\hat{A}\hat{E}2} \cdot \rho_{\hat{o}} \cdot c_{\hat{o}}) \cdot \frac{dV_{\hat{A}\hat{E}2}(\tau)}{d\tau} &= [Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}(\tau) - Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau)] - Q_{i\hat{i}\hat{o}\hat{o}}(\tau), \end{aligned}$$

где  $Q_{i\hat{i}\hat{o}}(\tau) = K_{\hat{A}\hat{A}} \cdot (V_{\hat{A}\hat{A}})^{2/3} \cdot \tilde{N} \cdot [t_{\hat{o}}(\tau) - t_{i\hat{n}}]$  – потери тепла с поверхности бака-аккумулятора гелиоколлектора в окружающую среду, возникающие в процессе саморазряда;  $K_{\hat{A}\hat{A}}$  – коэффициент потерь тепла;  $V_{\hat{A}\hat{A}}$  – объем бака-аккумулятора;  $\tilde{N}$  – коэффициент формы бака;  $\rho_{\hat{o}}, c_{\hat{o}}$  – соответственно плотность и теплоемкость теплоносителя.

Для решения полученных уравнений энергетического баланса аккумуляторов тепла необходимо определить все составляющие правых частей при переменных режимах работы рассматриваемого варианта ИСЭ.

С целью определения влияния на эффективность работы системы входящих в нее элементов, представим уравнения теплового баланса этих элементов во многовариантном виде с учетом динамики происходящих в них тепловых процессов во времени.

Тепловой поток на выходе гелиоколлектора  $Q_{\tilde{a}\tilde{e}}(\tau)$  во многовариантном виде для трех возможных режимов работы гелиосистемы ИСЭ равен:

$$Q_{\tilde{a}\tilde{e}}(\tau) = \begin{cases} 0 & - (1) \\ 0 & - (2) \\ A_{\tilde{A}\tilde{E}} \cdot F_R \cdot [(\tau\alpha) \cdot H(\tau) - K_{\tilde{A}\tilde{E}} \cdot (t_{\tilde{A}\tilde{E}1}(\tau) - t_{i\tilde{n}}(\tau))] & - (3) \end{cases} \quad (1)$$

где  $A_{\tilde{A}\tilde{E}}$  – площадь солнечного коллектора;  $\tau\alpha$  – приведенный оптический коэффициент;  $H$  – плотность потока солнечного излучения, который поступает на наклонную поверхность ГК;  $K_{\tilde{A}\tilde{E}}$  – коэффициент потерь энергии;  $t_{i\tilde{n}}$  – температура окружающей среды;  $F_R$  – эффективный коэффициент отвода тепла от ГК.

Утилизированная тепловая мощность когенерационной установки в многовариантном виде для трех возможных режимов ее работы равна:

$$[Q_{\tilde{o}\tilde{o}}^{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}(\tau) - Q_{\tilde{o}\tilde{o}}^{\hat{a}\tilde{o}}(\tau)] = \begin{cases} 0 & - (1) \\ 0 & - (2), \\ G_{\tilde{n}\tilde{a}}(\tau) \cdot \tilde{n}_{\tilde{o}} \cdot (t_{\tilde{n}\tilde{a}}^{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}(\tau) - t_{\tilde{n}\tilde{a}}^{\hat{a}\tilde{o}}(\tau)) & - (3) \end{cases} \quad (2)$$

где  $G_{\tilde{n}\tilde{a}}, t_{\tilde{n}\tilde{a}}^{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}, t_{\tilde{n}\tilde{a}}^{\hat{a}\tilde{o}}$  – соответственно расход и температуры сетевой воды.

Потребляемая тепловая мощность  $Q_{i\tilde{i}\tilde{o}\tilde{o}}(\tau)$  в многовариантном виде для трех возможных режимов энергоснабжения потребителя равна:

$$Q_{i\tilde{i}\tilde{o}\tilde{o}}(\tau) = \begin{cases} 0 & - (1) \\ Q_{\tilde{A}\tilde{A}\tilde{N}}(\tau) + Q_{\tilde{A}\tilde{A}2}^{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}(\tau) & - (2). \\ Q_{\tilde{A}\tilde{A}\tilde{N}}(\tau) - Q_{\tilde{A}\tilde{A}2}^{\hat{a}\tilde{o}}(\tau) & - (3) \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, определено, что уравнения энергетического баланса аккумуляторов тепла (БА № 1, БА № 2) для рассмотренных режимов работы могут быть представлены в многовариантном виде, а именно:

– уравнение энергетического баланса для БА № 1:

$$(V_{\tilde{A}\tilde{E}1} \cdot \rho_{\tilde{o}} \cdot c_{\tilde{o}}) \cdot \frac{dt_{\tilde{A}\tilde{E}1}(\tau)}{d\tau} = \begin{cases} 0 & - (1) \\ 0 & - (2) - \\ A_{\tilde{A}\tilde{E}} \cdot F_R \cdot [(\tau\alpha) \cdot H(\tau) - K_{\tilde{A}\tilde{E}} \cdot (t_{\tilde{A}\tilde{E}1}(\tau) - t_{i\tilde{n}}(\tau))] & - (3) \end{cases} \quad (4)$$

$$K_{\tilde{A}\tilde{A}1} \cdot (V_{\tilde{A}\tilde{A}1})^{2/3} \cdot \tilde{N} \cdot [T_{\tilde{A}\tilde{E}1}(t) - T_f(t)];$$

– уравнение энергетического баланса для БА № 2:

$$\begin{aligned}
 (t_{\hat{A}\hat{E}2} \cdot \rho_{\hat{o}} \cdot c_{\hat{o}}) \cdot \frac{dV_{\hat{A}\hat{E}2}(\tau)}{d\tau} = & \begin{cases} 0 & - (1) \\ 0 & - (2) \\ G_{\tilde{n}\hat{a}}(\tau) \cdot \tilde{n}_{\hat{a}} \cdot (t_{\tilde{n}\hat{a}}^{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}(\tau) - t_{\tilde{n}\hat{a}}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau)) & - (3) \end{cases} \\
 - & \begin{cases} 0 & - (1) \\ Q_{\tilde{A}\hat{A}\tilde{N}}(\tau) + Q_{\tilde{A}\hat{A}2}^{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}(\tau) & - (2) \\ Q_{\tilde{A}\hat{A}\tilde{N}}(\tau) - Q_{\tilde{A}\hat{A}2}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau) & - (3) \end{cases} .
 \end{aligned} \tag{5}$$

Приведенные системы уравнений (4–5) в многовариантном виде описывают соответственно три режима работы контура гелиоколлектора, три режима работы когенерационной установки, которым соответствуют три режима потребления тепла.

Полученные системы уравнений (4–5) содержат линейные неоднородные дифференциальные уравнения (ЛНДУ) первого порядка [4].

Рассматриваемые системы уравнений содержат искомые переменные: температуру теплоносителя в БА № 1 –  $t_{\hat{A}\hat{E}1}(\tau)$  и объем теплоносителя в БА № 2 –  $V_{\hat{A}\hat{E}2}(\tau)$ , которые зависят от времени, а содержащие их ЛНДУ в общем виде соответственно представляются:

$$a_1 \cdot \frac{dt_{\hat{A}\hat{E}1}(\tau)}{d\tau} + b_1(t) \cdot t_{\hat{A}\hat{E}1}(\tau) = c_1(\tau); \tag{6}$$

$$a_2 \cdot \frac{dV_{\hat{A}\hat{E}2}(\tau)}{d\tau} = c_2(\tau), \tag{7}$$

где  $a_1, a_2$  – постоянные коэффициенты;  $b_1, c_1, c_2$  – коэффициенты уравнений, зависящие от времени  $\tau$ .

Будем считать, что коэффициенты  $b_1, c_1$ , входящие в уравнение (6), на заданном временном интервале  $[\tau_0, \tau_i]$  постоянны, тогда с учетом граничных условий получим в общем виде решение уравнения (6) на заданном интервале времени [4]:

$$t_{\hat{A}\hat{E}1}(\tau) = \frac{c_1}{b_1} + \left[ t_{\hat{A}\hat{E}1}(\tau_0) - \frac{c_1}{b_1} \right] \cdot e^{[(-b_1/a_1) \cdot (\tau - \tau_0)]}. \tag{8}$$

Сопоставление системы уравнений (4–5), представленных в многовариантном виде, с уравнением (6–7) позволяет сделать вывод, что величина коэффициентов  $b_1, c_1, c_2$  зависит от показателей и режимов работы ИСЭ, а именно:

- интенсивности инсоляции  $H$ ;
  - температуры окружающей среды  $t_{i\tilde{n}}$ ;
  - от теплофизических параметров гелиоколлектора;
  - от расхода и температуры сетевой воды  $G_{\tilde{n}\hat{a}}, t_{\tilde{n}\hat{a}}^{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}, t_{\tilde{n}\hat{a}}^{\hat{a}\hat{o}}$ ;
  - от характеристик системы ГВС и аккумулятора тепла ГВС;
  - от нагрузки когенерационной установки и тепловой нагрузки потребителя.
- В общем виде решение уравнения (7) на заданном интервале времени получим:

$$V_{\hat{A}\hat{E}2}(\tau) = V_{\hat{A}\hat{E}2}(\tau_0) + \frac{c_2}{a_2} \cdot (\tau - \tau_0). \quad (9)$$

Результаты анализа режимов работы ИСЭ представлены в систематизированном виде в табл. 1 и 2, которые содержат характеристики режимов работы ИСЭ и выражения для расчета коэффициентов  $a_1, b_1, c_1, a_2, c_2$ , которые входят в уравнения теплового баланса (6–7).

Таблица 1 – Результаты моделирования коэффициентов  $a_1, b_1, c_1$  уравнения (6) для разных режимов работы ИСЭ с гелиоколлектором

Режим работы гелиосистемы	Особенности работы ИСЭ	Выражения для определения коэффициентов $a_1, b_1, c_1$
Для всех режимов	$a_1 = const$	$a_1 = V_{\hat{A}\hat{E}1} \cdot \rho_{\delta} \cdot c_{\delta}$
<i>Режим 1</i> Тепловой поток на вых. гелиоколлектора равен нулю	$t_{\hat{A}\hat{E}1} \geq t_{\hat{A}\hat{E}1}^{max}$	$b_1 = -K_{\hat{A}\hat{A}1} \cdot (V_{\hat{A}\hat{A}1})^{2/3} \cdot \tilde{N}$ $c_1 = K_{\hat{A}\hat{A}1} \cdot (V_{\hat{A}\hat{A}1})^{2/3} \cdot \tilde{N} \cdot t_{i\tilde{n}}$
<i>Режим 2</i> Тепловой поток на вых. гелиоколлектора равен нулю	Инсоляция недостаточна	$b_1 = -K_{\hat{A}\hat{A}1} \cdot (V_{\hat{A}\hat{A}1})^{2/3} \cdot \tilde{N}$ $c_1 = K_{\hat{A}\hat{A}1} \cdot (V_{\hat{A}\hat{A}1})^{2/3} \cdot \tilde{N} \cdot t_{i\tilde{n}}$
<i>Режим 3</i> Прямое теплоснабжение от гелиоколлектора	$t_{\hat{A}\hat{E}1} < t_{\hat{A}\hat{E}1}^{max}$	$b_1 = (K_{\hat{A}\hat{A}1} \cdot (V_{\hat{A}\hat{A}1})^{2/3} \cdot \tilde{N} + A_{\hat{A}\hat{E}} \cdot F_R \cdot K_{\hat{A}\hat{E}})$ $c_1 = A_{\hat{A}\hat{E}} \cdot F_R \cdot [(\tau\alpha) \cdot H + K_{\hat{A}\hat{E}} \cdot t_{i\tilde{n}}] + K_{\hat{A}\hat{A}1} \cdot (V_{\hat{A}\hat{A}1})^{2/3} \cdot \tilde{N} \cdot t_{i\tilde{n}}$

Таблица 2 – Результаты моделирования коэффициентов  $a_2, c_2$  уравнения (7) для разных режимов работы ИСЭ и системы ГВС

Режим работы когенерационной установки	Особенности работы ИСЭ	Выражения для определения коэффициентов $a_2, c_2$
Для всех режимов	$a_2 = const$	$a_2 = t_{\hat{A}\hat{E}2} \cdot \rho_{\delta} \cdot c_{\delta}$
<i>Режим 1</i> Теплоснабжение от резервного источника тепла	$N_{\hat{a}\hat{e}} < N_{min}$	$\tilde{n}_2 = 0$
<i>Режим 2</i> Отсутствует необходимость потребления тепла	$Q_{i\hat{i}\hat{o}\hat{\delta}}(\tau) = 0$	$\tilde{n}_2 = 0$
<i>Режим 3</i> Теплоснабжение потребителя за счет утилизированного тепла	$[Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{a}\hat{o}}(\tau) - Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau)] > Q_{i\hat{i}\hat{o}\hat{\delta}}(\tau)$	$\tilde{n}_2 = G_{i\hat{a}} \cdot \tilde{n}_{\hat{a}} \cdot (t_{i\hat{a}}^{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} - t_{i\hat{a}}^{\hat{a}\hat{o}}) - Q_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}}(\tau) + Q_{\hat{A}\hat{A}2}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau)$
	$[Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{a}\hat{o}}(\tau) - Q_{\hat{o}\hat{o}}^{\hat{a}\hat{o}}(\tau)] < Q_{i\hat{i}\hat{o}\hat{\delta}}(\tau)$	$\tilde{n}_2 = G_{i\hat{a}} \cdot \tilde{n}_{\hat{a}} \cdot (t_{i\hat{a}}^{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} - t_{i\hat{a}}^{\hat{a}\hat{o}}) - Q_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}}(\tau) - Q_{\hat{A}\hat{A}2}^{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}(\tau)$

На рис. 2, в соответствии с изложенной выше методикой, представлены результаты расчета динамики аккумулирования тепла в баке-аккумуляторе гелиоколлектора в течение часа при максимальном значении полезной энергии гелиоколлектора, характерной соответственно для июля ( $H_{\text{макс}} = 550 \text{ Вт/м}^2$ ), сентября ( $H_{\text{макс}} = 450 \text{ Вт/м}^2$ ) и октября ( $H_{\text{макс}} = 350 \text{ Вт/м}^2$ ), которые свидетельствуют, что на небольшом интервале времени процесс аккумулирования тепла носит, примерно, линейный характер, а его скорость пропорциональна интенсивности полезной энергии гелиоколлектора  $H(\tau)$  [5].

На рис. 3 представлены результаты моделирования динамики изменения температуры теплоносителя в баке-аккумуляторе гелиоколлектора в течение суток для разных месяцев сезона теплоснабжения от гелиосистемы, которые показывают, что требуемая величина температуры для системы ГВС ( $t_{\text{ГВС}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ) при заданном объеме бака-аккумулятора достижима только в июле и в других относительно “жарких” месяцах. В сентябре и октябре максимальное значение температуры в баке-аккумуляторе соответственно не превышает  $42 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому для достижения требуемой температуры необходимо предусмотреть техническую возможность снижения объема теплоносителя в баке соответственно на 27 % и 44 % или догреть теплоноситель в водогрейном котле.

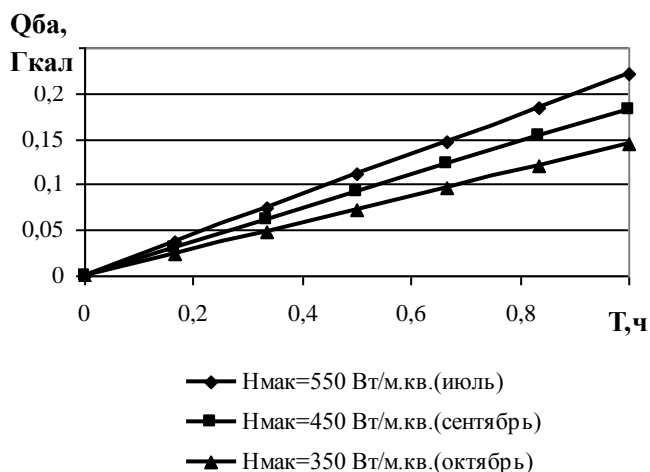


Рисунок 2 – Динамика аккумулирования тепла в баке-аккумуляторе гелиоколлектора

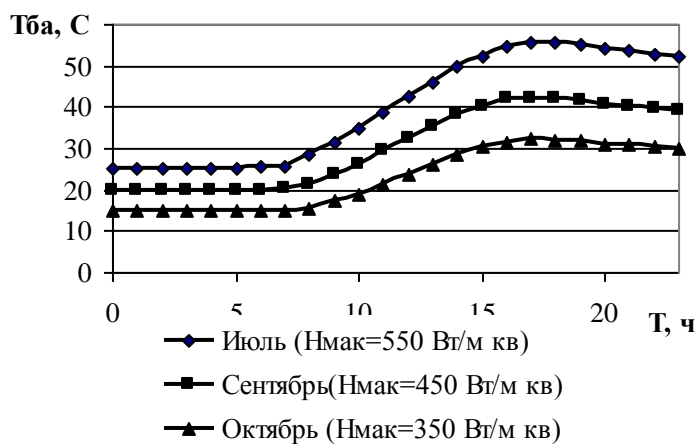


Рисунок 3 – Динамика изменения температуры теплоносителя в баке-аккумуляторе гелиоколлектора в течение суток

### **Выводы**

1. Для интегрированных систем когенерации с гелиоколлектором разработана методика многовариантного анализа режимов работы, на основании которой можно выбрать наиболее эффективный и надежный режим работы системы.
2. Разработан способ численного моделирования динамики изменения температуры и объема теплоносителя в аккумуляторах тепла, на основе которого определены коэффициенты системы ЛНДУ для различных режимов работы ИСЭ.

### **Литература**

1. Гейвандов И.А., Стоянов Н.И. Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии на автономных малых электростанциях // Научные школы и научные направления СевКав ГТУ. – Ставрополь: СевКав ГТУ, 2001. – С. 241–243.
2. Баласанян Г.А. Оценка эффективности интегрированных когенерационных систем // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2006. – № 3. – С. 9–12.
3. Баласанян Г.А., Мазуренко А.С. Использование аккумулирования тепла при согласовании графиков тепловой и электрической нагрузок когенерационных установок // Интегровані технології та енергозбереження. – 2005. – № 3. – С. 27–33.
4. Гутер Р.С., Янпольский А.Р. Дифференциальные уравнения. – М.: Высшая школа, 1976. – 304 с.
5. Денисова А.Е. Моделирование режимов работы комплексной альтернативной системы теплоснабжения (КАСТ) // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 1 (7). – С. 126–130.

УДК 621.311.22

Баласанян Г.А.

### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КОГЕНЕРАЦІЇ З ГЕЛІОКОЛЕКТОРОМ**

Розроблено методику багатоваріантного аналізу режимів роботи інтегрованої систем енергопостачання на базі установок когенерації малої потужності з геліоколектора. Представлена математична модель і визначені коефіцієнти системи диференціальних рівнянь різних режимів роботи інтегрованої системи. Розрахована динаміка акумуляції тепла в системі.