

УДК 662.997:697.7

В.В. Высочин, канд. техн. наук., доц., Одес. нац. политехн. ун-т

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕЛИОСИСТЕМЫ С СЕЗОННЫМ АККУМУЛЯТОРОМ ТЕПЛА

В.В. Высочин. Математична модель геліосистеми із сезонним акумулятором тепла. Розроблено замкнуту систему рівнянь математичної моделі, що дозволяє досліджувати процеси нестационарного перетворення тепла в рідинній геліосистемі із сезонним акумулятором тепла.

Ключові слова: математична модель, геліосистема, тепловий акумулятор, сезонний акумулятор.

В.В. Высочин. Математическая модель гелиосистемы с сезонным аккумулятором тепла. Разработана замкнутая система уравнений математической модели, которая позволяет исследовать процессы нестационарного преобразования тепла в жидкостной гелиосистеме с сезонным аккумулятором тепла.

Ключевые слова: математическая модель, гелиосистема, тепловой аккумулятор, сезонный аккумулятор.

V.V. Wysochin. Mathematical model of a solar-plant system with the seasonal heat accumulator. The closed system of equations of the mathematic model is developed, which allows to investigate the processes of non-steady transformation of heat in a liquid solar-plant system with the seasonal accumulator.

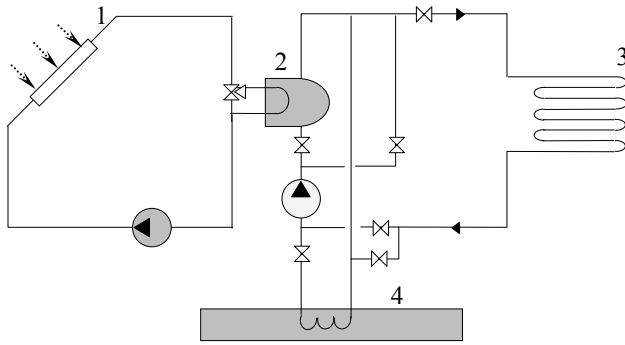
Keywords: mathematical model, solar-plant system, heat accumulator, seasonal accumulator.

Для системы солнечного отопления существует значительное несоответствие между сезонным предложением и спросом энергии [1]. В летний период гелиосистема производит значительное количество невостребованной энергии, а в зимний имеет место дефицит тепла. Основным способом согласования предложения и потребления является аккумулирование энергии.

Существует большое количество положительных примеров работы гелиосистем с сезонными аккумуляторами тепла (САТ). Они отличаются конструкцией и видом аккумулирующего вещества. По виду аккумулирующего вещества (насадки) САТ разделяются на жидкостные (водяные) и твердотельные [1]. Водяные сезонные аккумуляторы гелиосистем, предназначенных для односемейных коттеджей, довольно неудобны [2]: необходимо обслуживание и существует опасность прорыва большой массы воды. Альтернативой является твердотельный аккумулятор с тепловой изоляцией. Твердотельные дисперсные аккумуляторы, например гравийные, используемые в крупных системах водяного теплоснабжения, где существует необходимость удержания свода большого размера и массы, для небольших объектов не имеют смысла: при легком верхнем покрытии отпадает необходимость в насадке, выполняющей конструктивную функцию опоры в водяном бассейне. Подходящей конструкцией твердотельного САТ может служить монолитный бетонный блок со встроенным теплообменником [2]. Система полностью безопасна, не требует обслуживания и несложна при строительстве.

Недостаток сведений о работе таких аккумуляторов не позволяет корректно проектировать полностью автономные гелиосистемы, не требующие дублирующих источников тепла, что приводит к удорожанию проекта. Известные исследования посвящены грунтовым аккумуляторам без тепловой изоляции [3]. Их эффективность невысока — имеет место значительная потеря энергии. Поэтому существует необходимость в разработке метода исследования работы сезонных аккумуляторов с бетонной насадкой и тепловой изоляцией.

Математическая модель для исследования описывает двухконтурную гелиосистему с водяным баком-аккумулятором (БА) суточного цикла работы и сезонным бетонным аккумулятором (см. рисунок). САТ включен во второй контур гелиосистемы с водяным теплоносителем. Рассматриваются нестационарные условия работы гелиосистемы с определением мгновенной тепловой производительности и температуры теплоносителей в течение заданных суток.



Расчетная схема гелиосистемы: 1 — солнечные коллекторы; 2 — суточный аккумулятор тепла бак-аккумулятор; 3 — потребитель; 4 — сезонный аккумулятор тепла

Для математической модели разработан удобный для реализации в компьютерной программе расчетный метод определения климатических условий работы солнечного коллектора (СК). Соотношение для суммарной дневной облученности горизонтальной поверхности получено при обработке среднемесячных данных [4], в частности, для Одесской области,

$$H_{\Gamma}(n_m) = 0,0269n_m^4 - 0,6909n_m^3 + 5,1477n_m^2 - 9,2595n_m + 8,7232, \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{день}),$$

где n_m — номер месяца в году,

$$n_m = n \frac{12}{365} = 0,0329n.$$

Максимальная мгновенная интенсивность облучения горизонтальной поверхности,

$$H_{\Gamma}^{\max} = \frac{H_{\Gamma}(n_m) \cdot 10^3}{N \left(1,707 + \frac{50}{365 - n} \right)}, \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где N — продолжительность дня;

n — номер дня в году.

Мгновенная интенсивность облучения горизонтальной поверхности в предположении синусоидального закона ее изменения в развертке дня,

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^{\max} \sin\left(\frac{\pi t'}{N}\right) \frac{1}{1 + (20370 - 1226N) \exp(-t)}, \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где t' — продолжительность периода от восхода солнца до текущего времени, $t' = t - t_{\text{всх}}$;

t — текущее время;

$t_{\text{всх}}$ — время восхода солнца, $t_{\text{всх}} = 12,27 - 0,52N$.

Для температуры воздуха получены расчетные соотношения на основе эмпирических данных [5]:

— при $t_{\text{всх}} > t > t_{\text{зах}}$

$$T_a = X + \frac{Y}{\text{tg } \varphi} \left[\frac{1,507N - 3,14t + 45,03 + 0,0258n - 9,345 \cdot 10^{-5} n^2}{N} \right],$$

где $t_{\text{зах}}$ — время захода солнца, $t_{\text{зах}} = t_{\text{всх}} + N$;

$X = 2,884 \cdot 10^{-8} n^4 - 2,2845 \cdot 10^{-5} n^3 + 5,18 \cdot 10^{-3} n^2 - 0,2508n + 0,0751$;

$Y = 0,1792 + 0,044n - 1,217 \cdot 10^{-4} n^2$;

φ — широта местности;

— при $24 > t > t_{\text{зах}}$

$$T_a = T_{\text{зах}} - \frac{T_{\text{зах}} - T_{\text{всх}}}{24 - N} (t - t_{\text{зах}});$$

— при $0 < t < t_{\text{всх}}$

$$T_a = T_{\text{зах}} - (t + 24 - t_{\text{зах}}) \frac{T_{\text{зах}} - T_{\text{всх}}}{24 - N},$$

где $T_{\text{всх}}$ и $T_{\text{зах}}$ — температуры воздуха соответственно при $t_{\text{всх}}$ и $t_{\text{зах}}$.

Погрешность предложенного метода описания климатических характеристик не превышает 6 % от данных источников [4, 5].

Количество полезной теплоты, поглощаемой СК, можно найти из выражения

$$q_{\text{пол}} = H_r R(\tau\alpha) - U[0,5(T'_{11} + T''_{11}) - T_a],$$

где T'_{11} и T''_{11} — температуры теплоносителя на входе и выходе из коллектора, соответственно;

R — коэффициент, учитывающий ориентацию коллектора относительно горизонтальной плоскости;

$(\tau\alpha)$ — оптическая характеристика коллектора;

U — коэффициент потерь тепла коллектором.

Здесь принят линейный закон изменения температуры вдоль поверхности абсорбера и равенство температур абсорбера и теплоносителя. Такие допущения являются приемлемыми для теплотехнических расчетов [6].

Температура теплоносителя, который поступает в теплообменник БА,

$$T'_{11} = T''_{11} + \frac{q_{\text{пол}}}{\dot{m}_1 c_1},$$

где \dot{m}_1 , c_1 — массовый расход и теплоемкость теплоносителя, соответственно.

Поверхность нагревателя БА имеет вид одно- или многоступенчатого трубчатого теплообменника. Нагреватель работает в нестационарном режиме, при котором температура теплоносителя изменяется во времени, поэтому закон изменения температуры вдоль поверхности может существенно отличаться от экспоненциального, положенного в основу расчета среднелогарифмического температурного напора. С учетом этого для определения расчетной температуры поверхности теплообменника тепловой баланс теплообменника БА рассматривается в неустановившемся тепловом режиме

$$\dot{m}_1 c_1 \frac{dT_{11}}{dt} - k_{11} \pi d_{11} (T_{11} - T_{12}) - f_{11} (c\rho)_1 \frac{dT_{11}}{dt} = 0,$$

где $(c\rho)_1$ — теплоемкость и плотность греющего теплоносителя соответственно;

T_{11} — локальная, мгновенная температура греющей среды;

l — длина трубки теплообменника;

T_{12} — мгновенная средняя температура нагреваемой среды в БА;

k_{11} — коэффициент теплопередачи для теплообменника;

d_1 — внутренний диаметр трубки теплообменника;

f_{11} — площадь сечения трубки.

Средняя вдоль трубки теплообменника температура греющего теплоносителя в силу сложного закона изменения во времени определяется как мгновенная, осредненная по длине канала

$$T_{11\text{cp}} = \frac{1}{l} \int_0^l T_{11} dl.$$

Уравнение сохранения энергии для нагреваемой воды в БА составлено для неустановившегося режима, но при условии равномерного распределения мгновенной температуры в объеме

$$k_{11} F_{11} (T_{11\text{cp}} - T_{12}) - k_{12} F_{12} (T_{12} - T_a) - V_{12} (c\rho)_2 \frac{dT_{12}}{dt} - \dot{m}_{12} (T_{12} - T_{13}) = 0,$$

где k_{12} — коэффициент теплопередачи для внешней стенки БА;
 F_{11} и F_{12} — площади теплопередающей поверхности теплообменника и внешней стенки БА, соответственно;
 V_{12} — объем БА;
 $(c\rho)_2$ — теплоемкость и плотность нагреваемой воды;
 \dot{m}_{12} — массовый расход питающей воды;
 T_{13} — температура питающей воды на входе в БА.

Поверхность нагревателя САТ также имеет вид трубчатого теплообменника, который закладывается в бетон. Уравнение теплового баланса теплообменника в неустановившемся тепловом режиме

$$\dot{m}_{21}c_2 \frac{dT_{21}}{dl} - k_{21}\pi d_{21}(T_{21} - T_{22}) - f_{21}(c\rho)_2 \frac{dT_{21}}{dt} = 0,$$

где \dot{m}_{21} — массовый расход воды через теплообменник;
 T_{21} — температура греющей воды, $T_{21} = T_{12}$;
 T_{22} — средняя температура бетона;
 k_{21} — коэффициент теплопередачи для теплообменника;
 d_{21} — внутренний диаметр трубки теплообменника;
 f_{21} — площадь сечения трубки.

Средняя вдоль трубки теплообменника температура греющего теплоносителя так же, как и для теплообменника БА, представляется в виде мгновенной осредненной по длине — T_{21cp} .

Уравнение сохранения энергии в нестационарном режиме нагрева бетона САТ, принимается с упрощением — в предположении равномерного поля мгновенной температуры в объеме, что допустимо при условии хорошего распределения поверхности теплообменника в массиве

$$k_{21}F_{21}(T_{21cp} - T_{22}) - k_{22}F_{22}(T_{22} - T_{ip}) - V_{22}(c\rho)_{22} \frac{dT_{22}}{dt} = 0,$$

где k_{22} — коэффициент теплопередачи для внешней стенки САТ;
 F_{21} и F_{22} — площади теплопередающих поверхностей теплообменника и САТ соответственно;
 V_{22} — объем САТ.

Система дифференциальных уравнений нестационарного теплообмена решается численно, конечно-разностным методом. Математическая модель, содержащая приведенные соотношения, позволяет исследовать процессы нестационарного преобразования энергии в гелиосистеме с САТ при различных краевых условиях.

Литература

1. Гелиотеплонасосные системы теплоснабжения с сезонным аккумулированием теплоты. Обзор. информ. / Сост. Н.В. Харченко — М.: Информэнерго, 1989. — 56 с.
2. Шило, В. Кто будет внедрять энергосберегающие технологии / В. Шило // ЭСТА. — 2008. — № 5. — С. 70 — 71.
3. Накорчевский, А.М. Проблемы грунтового аккумулирования теплоты и методы их решения / А.М.Накорчевский, Б.И. Басок, Т.Г. Беляева // Пром. теплотехника. — 2003. — Т. 25, № 3. — С. 42 — 44.
4. Справочник по климату СССР. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Вып. 10. Украинская ССР. Ч. 1. — Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1966. — 124 с.

5. Справочник по климату СССР. Температура воздуха и почвы. Вып. 18. Украинская ССР. Ч. 2. — Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1967. — 607 с.
6. Аvezов, Р.Р. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Р.Р. Аvezов, М.А. Барский-Зорин, И.М. Васильева. — М.: Стройиздат, 1990. — 324 с.

References

1. Gelioteplosnosnye sistemy teplosnabzheniya s sezonnym akkumulirovaniem teploty [Solar-plant pump systems with the seasonal heat accumulation]. Obzor. inform. / N.V. Harchenko — Moscow, 1989, 56 p.
2. Shilo, V. Kto budet vnedryat' energosberegayushchie tekhnologii [Who will introduce energy-saving technologies] / V. Shilo // ESTA. — 2008. — № 5. — P. 70 — 71.
3. Nakorchevskiy, A.M. Problemy gruntovogo akkumulirovaniya teploty i metody ikh resheniya [Problems of soil heat-accumulation and their solution methods] / A.M.Nakorchevskiy, B.I. Basok, T.G. Belyayeva // Prom. teplotehnika [Industrial heat engineering]. — 2003. — V. 25, № 3. — P. 42 — 44.
4. Spravochnik po klimatu SSSR. Solnechnaya radiatsiya, radiatsionnyy balans i solnechnoye siyanie [Reference book on the climate of the USSR. Solar radiation, radiation balance and solar radiance]. Issue 10. Ukrainian SSR. Part 1. — Leningrad, 1966. — 124 p.
5. Spravochnik po klimatu SSSR. Temperatura vozdukha i pochvy [Reference book on the climate of the USSR. Air and soil temperature]. Issue 18. Ukrainian SSR. Part 2. — Leningrad, 1967. — 607 p.
6. Avezov, R.R. Sistemy solnechnogo teplo- I khladosnabzheniya [Solar heat-and-cold supply / R.R. Avezov, M.A. Barskiy-Zorin, I.M. Vasil'eva. — Moscow, 1990. — 324 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Денисова А.Е.

Поступила в редакцию 26 января 2011 г.