

# Математическое моделирование работы устройства для нагрева воды за счёт солнечной энергии

*А.А. Маслова, ст. преподаватель, М.С. Жужин, к.т.н.,  
ГБОУ ВО Нижегородский ГИЭУ*

Разработка эффективных солнечных установок оптимальной конфигурации, обеспечивающих максимальный энергетический и экономический эф-

фект от применения, требует надёжных знаний о природно-климатических условиях места эксплуатации установки и прежде всего о поступлении солнечной радиации на теплоприёмные поверхности [1, 2].

В настоящее время огромное внимание уделяется тому, каким образом использовать всю энергию

солнечной радиации, приходящую на поверхность земли. Расчёты солнечного излучения построены на основе известных теоретических работ, например, К.Я. Кондратьева [3, 4].

На рисунке 1 представлен конкретный пример модели расчёта теплопоступления от солнечной радиации на горизонтальную поверхность, расположенную на 56° северной широты и 44° восточной долготы. На горизонтальную поверхность за год в Нижегородской области приходится в среднем около 3000–3800 МДж/м<sup>2</sup> прямой солнечной радиации [5].

**Материал и методы исследования.** По результатам опытных измерений были выявлены зависимости температуры воды от мощности циркуляционного насоса и мощности солнечного излучения при различной продолжительности работы водонагревателя (60, 80, 100 и 120 мин).

Расчёты проводили с помощью вычислительной программы Marple [6], версия 17, при использовании при этом четырёх стандартных пакетов: линейной алгебры, графики, приближения функций, расширенной графики: *restart* : *with (linalg* : *with (plots* ) : *with (CurveFitting* ) : *with (plottools* ) :

Аппроксимация экспериментальных зависимостей температуры воды *T* от времени *t*, *T(t)* проводилась при различных электрических мощностях насоса 33/39/44 Вт (1/2/3 скорости) и разной мощности солнечного излучения (1, 5, 3 и 6 кВт · ч/м<sup>2</sup> · сут.), результаты которых представлены в таблице.

Показатели экспериментальных измерений

Время нагрева, мин	20	40	60	80	100	120
Мощность 1,5 кВт						
Температура воды, °С	24,2	27,4	30,1	33,4	36,2	39,0
Мощность 3 кВт						
Температура воды, °С	25	28,7	31,3	34,8	38,1	40,3
Мощность 6 кВт						
Температура воды, °С	25,3	30,1	33,3	36,4	40,3	44,2

Основой для расчёта потока солнечной радиации, падающей на поверхность земли, является усовершенствованный алгоритм Пиксера и Ласло, использовавшийся в проекте NASA «Surface meteorology and Energy» [7, 8].

Основополагающими факторами являются время нагрева, температура воды и мощность солнечного излучения [9, 10].

Изначальная температура воздуха была 20,8 °С, начальная температура воды – 17°С. Для имитации солнечного излучения мы использовали инфракрасный обогреватель марки SUNNY мощностью 3 кВт. Для движения воды был использован циркуляционный насос S.A.V. – heat 25/40. Для измерения температуры воды применяли погружной термометр марки testo 925.

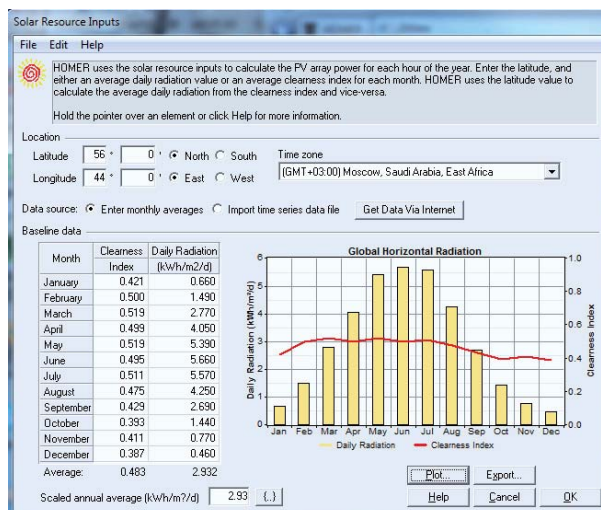


Рис. 1 – Среднемесячная инсоляция горизонтальной поверхности Нижегородской области по данным NASASSE

Был рассмотрен пример расчёта температуры воды на выходе при установленной мощности солнечного излучения в 1,5 кВт и мощности циркуляционного насоса 33 Вт.

Матрица времени нагрева имеет вид:

$$t_{1,5} := \text{matrix}(4,1,[60;80;100;120]);$$

$$T_{1,5} := \begin{bmatrix} 60 \\ 80 \\ 100 \\ 120 \end{bmatrix}. \tag{1}$$

Матрица температуры воды имеет вид:

$$T_{1,5} := \text{matrix}(4,1,[30,1;33,4;36,2;36,0]);$$

$$T_{1,5} := \begin{bmatrix} 30,1 \\ 33,4 \\ 36,2 \\ 36,0 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Аппроксимацию проводили для каждого значения времени нагрева из указанного выше диапазона. Для определения неизвестных параметров составляли матричное уравнение в соответствии с полученными экспериментальными данными:

$$x_{1,5} := \begin{bmatrix} 216000 & 3600 & 60 & 1 \\ 512000 & 6400 & 80 & 1 \\ 1000000 & 10000 & 100 & 1 \\ 1728000 & 14400 & 120 & 1 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

В качестве аппроксимирующего был получен полином третьего порядка, отражённый формулой 3:

$$Y_{1,5} := 0,000010 \cdot t^3 - 0,0031 \cdot t^2 + 0,45 \cdot t + 12. \tag{4}$$

Аналогичным образом проводили расчёты для каждого значения мощности солнечного излучения из указанного выше диапазона.

При мощности солнечного излучения, равной 3 кВт, и при тех же значениях времени нагрева получили значения температуры воды на выходе: матрица температуры воды:

$$T3 := \text{matrix}(4,1,[31,3;34,8;38,1;40,3]);$$

$$T3 := \begin{bmatrix} 31,3 \\ 34,8 \\ 38,1 \\ 40,3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

При мощности солнечного излучения, равной 3 кВт, и при тех же значениях времени нагрева получили значения температуры воды на выходе:

$$Y_3 := -0,000019 \cdot t^3 + 0,0042 \cdot t^2 - 0,14 \cdot t + 29. \quad (6)$$

Соответственно были получены значения температуры воды на выходе для значения мощности солнечного излучения, равной 6 кВт:

матрица температуры воды:

$$T6 := \text{matrix}(4,1,[33,3;36,4;40,3;44,2]);$$

$$T6 := \begin{bmatrix} 33,3 \\ 36,4 \\ 40,3 \\ 44,2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

В результате температура воды на выходе будет иметь вид:

$$Y_6 := -0,000017 \cdot t^3 + 0,0050 \cdot t^2 - 0,30 \cdot t + 37. \quad (8)$$

Графическое изображение указанных выше зависимостей представлено на рисунке 2.

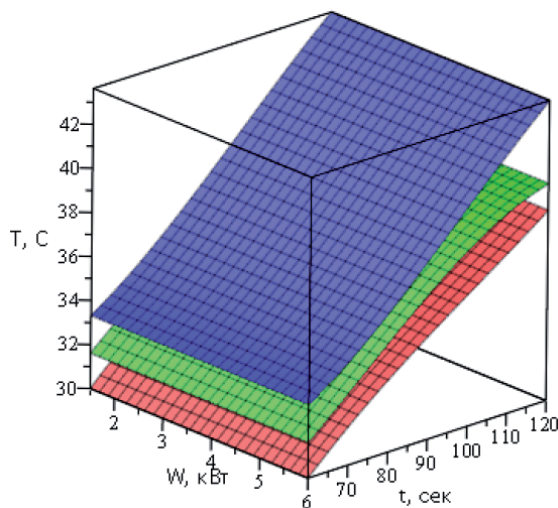


Рис. 2 – Зависимость температуры воды от времени нагрева при мощности циркуляционного насоса 33 Вт

По такому же принципу были рассчитаны зависимости температуры воды от времени нагрева, мощности циркуляционного насоса, равной 39 Вт, и мощности солнечного излучения, равной 1,5; 3 и 6 кВт:

$$Y_{1,5} := 0,000027 \cdot t^3 - 0,0064 \cdot t^2 + 0,57 \cdot t + 9,6;$$

$$Y_3 := 0,000029 \cdot t^3 - 0,0085 \cdot t^2 + 0,93 \cdot t - 2,0;$$

$$Y_6 := -0,000015 \cdot t^3 + 0,0046 \cdot t^2 - 0,32 \cdot t + 34.$$

Графическое изображение указанных выше зависимостей представлено на рисунке 3.

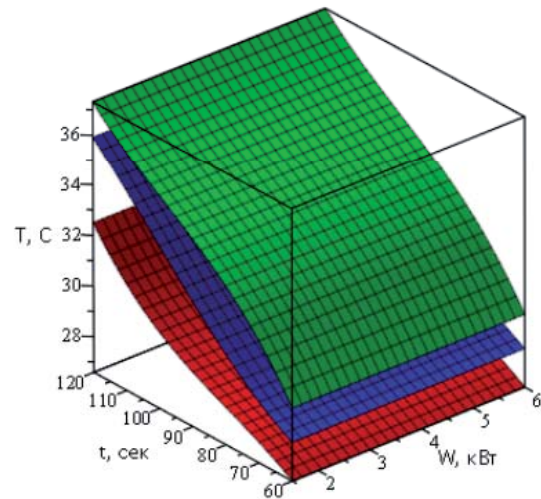


Рис. 3 – Зависимость температуры воды от времени нагрева при мощности циркуляционного насоса 39 Вт

Далее проведены расчёты для мощности циркуляционного насоса 44 Вт:

$$Y_{1,5} := -0,000021 \cdot t^3 + 0,00088 \cdot t^2 + 0,0033 \cdot t + 22;$$

$$Y_3 := 0,000044 \cdot t^3 - 0,012 \cdot t^2 + 1,3 \cdot t - 12;$$

$$Y_6 := -0,000033 \cdot t^3 + 0,0092 \cdot t^2 - 0,67 \cdot t + 40.$$

Графическое изображение указанных выше зависимостей представлено на рисунке 4.

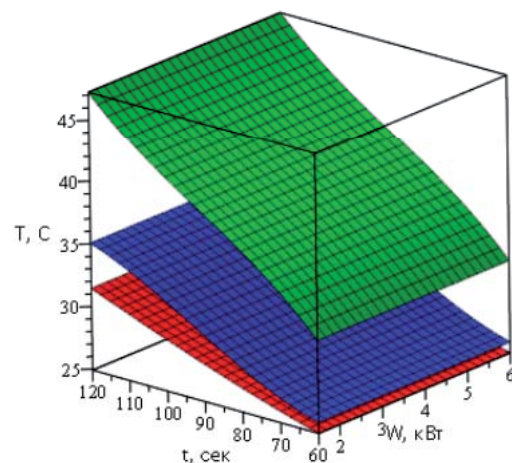


Рис. 4 – Зависимость температуры воды от времени нагрева при мощности циркуляционного насоса 44 Вт

Для точности экспериментов были также проведены расчёты для выключенного циркуляционного насоса.

Зависимости для различных показателей мощности солнечного излучения имеют вид:

$$Y_{1,5} := -0,000052 \cdot t^3 + 0,013 \cdot t^2 - 0,9 \cdot t + 43;$$

$$Y_3 := 0,000013 \cdot t^3 - 0,0024 \cdot t^2 + 0,26 \cdot t + 14;$$

$$Y_6 := -0,000025 \cdot t^3 + 0,0071 \cdot t^2 - 0,50 \cdot t + 35.$$

Графическое изображение указанных выше зависимостей представлено на рисунке 5.

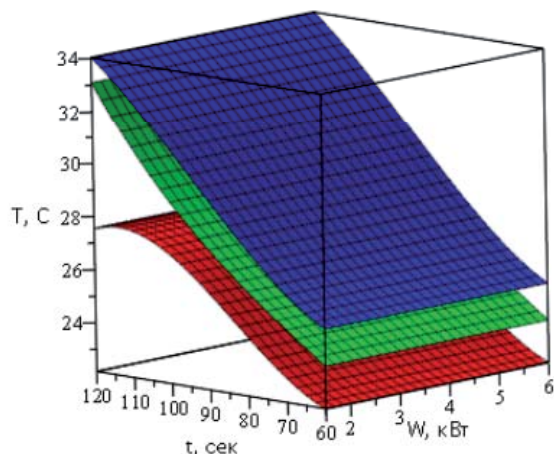


Рис. 5 – Зависимость температуры воды от времени нагрева при ламинированной циркуляции воды

Полученные зависимости свидетельствуют о хорошем совпадении аппроксимированной функции с расчётными данными.

**Результаты исследования и выводы.** В ходе проведения испытаний была выявлена оптимальная мощность работы циркуляционного насоса. Нагрев воды происходит быстрее всего при мощности циркуляционного насоса, равной 33 Вт. Также данные экспериментов помогли нам получить полином третьего порядка, показывающий работу всего устройства для нагрева воды за счёт солнечной энергии. Для этого изначально были выбраны ряд факторов, которые могут повлиять на процесс нагрева воды. Влияние данных факторов представлено на рисунке 6.

В качестве основных факторов, влияющих на процесс нагрева воды, оказались время нагрева, мощность солнечного излучения и мощность

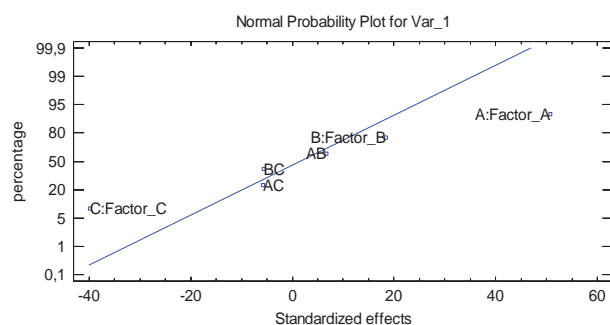


Рис. 6 – Показатели влияния основных факторов

циркуляционного насоса. Полученные зависимости свидетельствуют о хорошем совпадении аппроксимированной функции с расчётными данными [11].

Математическая модель работы устройства для нагрева воды за счёт солнечной энергии имеет вид:

$$Y := 28,0625 + 0,234861 \cdot X_1 + 1,45 \cdot X_2 - 0,206818 \cdot X_3 + 0,0087037 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,00310606 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0393939 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

где  $Y$  – температура воды;

$X_1$  – время нагрева воды;

$X_2$  – мощность солнечного излучения;

$X_3$  – мощность циркуляционного насоса.

Математическая обработка экспериментальных данных лабораторных испытаний показала зависимость величины температуры воды на выходе от времени нагрева, мощности солнечного излучения и мощности циркуляционного насоса. Для данных зависимостей составлено матричное уравнение и выведены полиномы зависимостей для различных значений. При этом наблюдается незначительная погрешность влияния основных факторов. Проведённый математический анализ позволил определить пригодность устройства для нагрева воды на животноводческих комплексах предприятий Нижегородской области.

### Литература

1. Судаев Е.М., Бастрон А.В., Беляков А.А. Теоретические модели поля солнечной радиации и результаты исследований солнечного водонагревателя в климатических условиях Красноярского края // Вестник КрасГАУ. 2008. № 4. С. 245–254.
2. Попель О.С. Определение ресурсов энергии солнечного излучения по территории России / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец [и др.] // Энергия: экономика, техника, экология. 2007. № 1. С. 15–23.
3. Коломиец Ю.Г. Исследование эффективности преобразования энергии солнечного излучения в низкопотенциальное тепло в различных климатических условиях: дис. ... канд. техн. наук. М.: Объединенный институт высоких температур РАН, 2009. 174 с.
4. Виссарионов В.И. Методы расчёта ресурсов возобновляемых источников энергии: учеб. пособ. / А.А. Бурмистров, В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина [и др.]. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 144 с.
5. Маслова А.А., Сбитнев Е.А., Осокин В.Л. Моделирование поля солнечной радиации // Вестник НГИЭИ. 2015. № 4. С. 56–62.
6. Стребуляев С.Н., Васин Д.Ю. Использование системы аналитических вычислений Maple для решения задач прикладной математики: учеб. пособ. / Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета, 2007. 170 с.
7. Micropower System Modeling with HOMER, by T. Lambert, P. Gilman, and P. Lilienthal. Published in «Integration of Alternative Sources of Energy», by F. Farret and M. Simoes Copyright, 2006. 418 с.
8. Маслова А.А., Маслов М.М. Теоретические предпосылки создания солнечного водонагревателя // Вестник НГИЭИ. 2015. № 4. С. 67–76.
9. Земсков В.И. Возобновляемые источники энергии в АПК: учеб. пособ. СПб.: Издательство «Лань», 2014. 368 с.
10. Безруких П.П. Научно-техническое и методологическое обоснование ресурсов и направлений использования возобновляемых источников энергии: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, 2003. 268 с.
11. Дулепова Ю.М. Обоснование возможности использования нового энергосберегающего устройства // Вестник НГИЭИ. 2017. № 5. С. 61–68.