

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-367-384>

УДК 662.997

Моделирование и расчет параметров малой гелиотеплицы с целью повышения энергоэффективности

Г. Н. Узаков¹⁾, В. А. Седнин²⁾, А. Б. Сафаров^{1,3)}, Р. А. Мамедов³⁾,
О. И. Рахматов¹⁾

¹⁾Каршинский государственный технический университет
(Карши, Республика Узбекистан),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Бухарский государственный технический университет (Бухара, Республика Узбекистан)

Реферат. В статье представлены результаты исследований, в ходе которых на примере климатических условий Кашкадарьинской области (Республика Узбекистан) разработана методика повышения энергоэффективности двухскатных солнечных теплиц. Литературный анализ показал наличие потенциала экономии энергии в тепличном хозяйстве агропромышленного сектора за счет оптимизации параметров солнечных теплиц. Одновременно показано, что, несмотря на обширность выполненных исследований в ряде стран в данном направлении, требуется продолжение изучения проблемы с выходом на практическое применение параметров их ориентации на местности для различных географических регионов по максимизации воспринимаемой суммарной солнечной радиации. В работе приведен анализ результатов исследований по установлению зависимости суммарной солнечной радиации, падающей на двухскатную теплицу, покрытую стеклом, с полезной площадью 50 м², высотой стен 2 м и высотой ската крыши 1,5 м, от конструктивных параметров последней и траектории движения солнца. Моделирование режимов функционирования гелиотеплицы осуществлено в пакете MATLAB с учетом изменения параметров окружающей среды местности в период с 15 ноября 2023 г. по 15 марта 2024 г. с широтой местности 38,87° и ориентацией от 0 до 90° с интервалом 5°. В результате моделирования определены оптимальные параметры теплицы для приведенного выше периода (азимутальный угол поверхности $\gamma_{\text{опт}} = 45^\circ$, угол наклона поверхности $\beta_{\text{опт}} = 50^\circ$) при максимальной суммарной солнечной радиации за указанный период, равной $\sum I_{\text{max}} = 35660$ МДж, что превышает на 20 % радиацию для теплицы стандартных размеров. Обобщение результатов моделирования позволило разработать методику определения геометрических характеристик (размеров и параметров ориентации) солнечных двухскатных теплиц с заданными климатическими условиями по критерию максимизации падающей суммарной солнечной радиации в зимний период года, которая может быть распространена для применения на другие регионы Узбекистана с целью повышения энергоэффективности агропромышленного сектора.

Ключевые слова: изотропная модель, двухскатная солнечная теплица, суммарная солнечная радиация, угол наклона поверхности, математическое моделирование, угол отклонения солнца

Для цитирования: Моделирование и расчет параметров малой гелиотеплицы с целью повышения энергоэффективности / Г. Н. Узаков [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 4. С. 367–384. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-367-384>

Адрес для переписки

Сафаров Алишер Бекмуродович
Каршинский государственный технический университет
просп. Мустакиллик, 225,
180100, г. Карши, Республика Узбекистан
Тел.: +998 90 299-41-24
a-safarov91@mail.ru

Address for correspondence

Safarov Alisher Bekmurodovich
Karshi State Technical University
225, Mustakillik Ave.,
180100, Karshi, Republic of Uzbekistan
Tel.: +998 90 299-41-24
a-safarov91@mail.ru

Simulation and Calculation of Parameters of a Small Solar Greenhouse in Order to Increase its Energy Efficiency

G. N. Uzakov¹⁾, V. A. Sednin²⁾, A. B. Safarov^{1,3)}, R. A. Mamedov³⁾,
O. I. Rakhmatov¹⁾

¹⁾Karshi State Technical University, (Karshi, Republic of Uzbekistan),

²⁾Belarusian National Technical University, (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Bukhara State Technical University, (Bukhara, Republic of Uzbekistan)

Abstract: The article presents the results of research, during which using the example of the climatic conditions of the Kashkadarya region (Republic of Uzbekistan) a methodology has been developed to increase the energy efficiency of double-slope solar greenhouses. A literature analysis has shown the potential for energy savings in the greenhouse farming of the agribusiness. At the same time, it is shown that, despite the extensive research carried out in a number of countries in this area, it is necessary to continue studying the problem of putting into practice the parameters of their orientation on the terrain for various geographical regions to maximize the perceived total solar radiation. The paper presents an analysis of the research results on the dependence of the total solar radiation incidence on a gable glass-roofed greenhouse with a usable area of 50 m², a wall height of 2 m and a roof slope height of 1.5 m on the design parameters of the latter and the trajectory of the sun. The simulation of the solar greenhouse operation modes was carried out in the MATLAB package, taking into account changes in the environmental parameters of the area in the period from November 15, 2023 to March 15, 2024 with a latitude of 38.87° and an orientation from 0 to 90° with an interval of 5°. As a result of the simulation, the optimal parameters of the greenhouse were determined for the above period (azimuthal angle of the surface $\gamma_{\text{opt}} = 45^\circ$, angle of inclination of the surface $\beta_{\text{opt}} = 50^\circ$) with the maximum total solar radiation for the specified period equal to $\sum I_{\text{max}} = 35660$ MJ, which exceeds by 20% the radiation for a standard-sized greenhouse. Generalization of the simulation results made it possible to develop a methodology for determining the geometric characteristics (dimensions and orientation parameters) of solar gable greenhouses with specified climatic conditions according to the criterion of maximizing the incident total solar radiation in winter, which can be extended to other regions of Uzbekistan in order to increase the energy efficiency of the agribusiness sector.

Keywords: isotropic model, gable solar greenhouse, total solar radiation incidence, surface tilt angle, mathematical simulation, sun deflection angle

For citation: Uzakov G. N., Sednin V. A., Safarov A. B., Mamedov R. A., Rakhmatov O. I. (2025) Simulation and Calculation of Parameters of a Small Solar Greenhouse in Order to Increase its Energy Efficiency. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (4), 367–384. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-367-384> (in Russian)

Введение

Для агросектора многих стран большое значение имеет повышение энергоэффективности технологических процессов за счет снижения их энергоемкости и вытеснения органического топлива возобновляемыми источниками энергии, а также применения гибридных систем энергоснабжения [1–3], что одновременно приводит к решению экологических проблем. В рамках решения этой проблемы в целом ряде стран ведутся научно-исследовательские работы по разработке новых конструкций гелиотеплиц с учетом климатических условий местности, определению оптимальных размеров и пространственной ориентации, технических решений расширения возможностей использования возобновляемых источников энергии [4, 5].

В исследовании [6] представлены результаты выбора формы и ориентации пяти типов автономных теплиц, ориентированных на применение

в местности с географическими координатами 31° широты и 77° долготы (Республика Индия), модели расчета солнечной радиации, теплового моделирования и экспериментальной апробации.

Автором [6] установлено, что теплица в форме с неравномерным пролетом получает максимальную солнечную радиацию ежемесячно в течение года на всех широтах, в то время как эллиптическая теплица получает минимальную солнечную радиацию. Восточно-западная ориентация во всех географических широтах позволяет наиболее эффективно использовать теплицы круглый год. При этом подсчитано, что теплицы получают больше суммарной солнечной радиации в зимние месяцы и меньше в летние. Также показано, что отличие температуры парникового воздуха в теплице с неравномерным пролетом от температуры воздуха в теплице эллиптической формы составляет $4,6^\circ\text{C}$ (максимум) и $3,5^\circ\text{C}$ (среднее дневное значение) на географической широте 31° [6].

В работе [7] представлены результаты оценки возможности использования пяти типов солнечных теплиц в турецком Байбуте на участках с географическими координатами от $39^\circ 52'$ до $40^\circ 37'$ широты и от $39^\circ 37'$ до $40^\circ 45'$ долготы. Исследованы теплицы с площадью от 50 до 400 м^2 с шагом изменения 50 м^2 и имеющие значение отношения длины теплицы к ширине k от 1 до 10, а азимутальные углы теплицы описаны от 0 до 90° . Высота всех типов теплиц была принята максимум 3 м. Представлена методика определения максимального суммарного солнечного излучения путем кодирования площади каждой поверхности двухскатной теплицы. Установлено, что оптимальная ориентация двухскатной теплицы площадью 50 м^2 составляет 23° , отношение длины теплицы к ширине $k = 3$, а суммарная солнечная радиация составляет 284,26 МДж за сезон.

В [8] предложена математическая модель определения суммарной солнечной радиации в период с 1 ноября по 1 марта для выбора оптимальной формы и ориентации шести различных типов автономных теплиц в южных районах Китая с географической широтой от 20° до $30,6^\circ$. Исходя из того, что максимальная суммарная солнечная радиация на единицу посевных земель в Хайкоу равна $4,1\text{ ГДж/м}^2$, в Фучжоу – $3,8\text{ ГДж/м}^2$, в Ухане – $3,6\text{ ГДж/м}^2$, в результате оптимизации была достигнута экономия затрат за сезон на отопление теплиц, составившая для Хайкоу $46,2\text{ \$/м}^2$, для Фучжоу – $42,9\text{ \$/м}^2$, для Ухани – $40,5\text{ \$/м}^2$. В статье отмечается, что теплицы ориентации восток – запад могут получать максимальное количество суммарной солнечной радиации зимой на всех широтах.

В исследовании [9] получена методика определения оптимальной ориентации гелиотеплиц, расположенных на географической широте местности 44° на территории Белграда (Сербия), которая лучше всего подходит для круглогодичного использования. При этом установлено, что ориентация солнечных теплиц с неравномерным пролетом с востока на запад была наиболее эффективной для всех проанализированных широт.

Авторы [10] провели исследования по определению оптимальных показателей ориентации и структуры теплиц, обеспечивающих восприятие максимального солнечного излучения, установленных на территории Китая. Изучалась зависимость максимального попадания солнечной радиации в теплицу в зависимости от ее высоты. Для г. Шэньян с географической широтой местности 42° оптимальная ориентация $7\text{--}9^\circ$ была рассчита-

на в зависимости от суммарной солнечной радиации и размеров теплицы. Результаты показывают, что регулировка ориентации теплицы позволила сэкономить 1200 кг угля и 432 МДж электроэнергии в год [10].

В [11] представлены результаты исследования по выбору оптимальной ориентации и конструкции теплицы для эффективного использования солнечного излучения с использованием многоцелевого генетического алгоритма. Исследования проводились на севере Ирана для местности с субтропическим климатом (город Рашт). Для расчета солнечной энергии, воспринимаемой теплицей, была разработана анизотропная модель солнечной радиации, основанная на метеорологических данных, оптических свойствах и рассеянии солнечной радиации в теплице с учетом потерь солнечной радиации со всех сторон теплицы. Согласно результатам, лучшее направление для двухскатной теплицы в северной части Ирана восток – запад, оптимальная длина является максимально возможной величиной (максимальное увеличение отношения длины к ширине L/W), независимо от размера площади посевных земель. Оптимальная общая высота солнечной теплицы и угол наклона крыши 3,6 м и 14° . Следует отметить, что модель, разработанная в этом исследовании, может быть расширена для других мест и климатов путем замены соответствующих метеорологических данных рассматриваемого месторасположения [11].

Авторы [12] провели исследования по сравнительному изучению влияния формы и ориентации трех типов теплиц в климатических условиях региона Марракеш (Королевство Марокко). Математическая модель для расчета общего количества часов солнечной радиации, получаемой каждой теплицей в течение года, разработана для ориентации север – юг и восток – запад. Размеры различных типов теплиц (длина, ширина и высота) принимались одинаковыми. Почасовая и ежемесячная солнечная радиация рассчитывалась индивидуально для всех изученных типов и направлений теплиц. По результатам исследования установлено, что теплицы типа «неравномерный пролет» с углом наклона крыши 12° , двухскатной с углом наклона 17° и эллиптического типа считаются оптимальными и получают максимальную солнечную радиацию. Теплица с «неравномерным пролетом» получает на 3,11 и 34,88 % больше годовой солнечной радиации, чем теплицы двухскатная и эллиптическая соответственно [12].

Результаты научных исследований, направленных на определение оптимальных конструкций солнечных теплиц в условиях изменяющегося климата с разработкой математических моделей для определения интенсивности и объема воспринимаемого солнечного излучения, а также технических решений по повышению энергоэффективности представлены также в целом ряде других работ [13–20]. Это подчеркивает актуальность проблемы, с одной стороны, и целесообразность продолжения исследований по определению оптимальных конструктивных размеров гелиотеплиц и разработке методик определения воспринимаемой суммарной солнечной радиации в зависимости от их ориентации для других климатических условий, в частности для условий резко континентального климата, с другой.

Описания объекта исследования и исходные данные

В качестве объекта исследования выбрана двухскатная солнечная теплица с полезной поверхностью 50 м^2 , шириной $2 \leq W_i \leq 7,1 \text{ м}$, длиной $7,1 \leq L_i \leq 25 \text{ м}$, с высотой стен 2 м и высотой ската крыши $1,5 \text{ м}$, покрытая стеклом. Расчеты проводились для периода с 15 ноября 2023 г. по 15 марта 2024 г., местоположение теплицы по географической широте $38,87^\circ$ (условия г. Карши), ориентация от 0 до 90° с интервалом изменения направления 5° .

На рис. 1 показана динамика изменения температуры и солнечной радиации на горизонтальную поверхность г. Карши в 2023 г. Самая высокая температура составила 26°C , средняя температура 20°C , минимальная температура -10°C , максимальная солнечная радиация 825 Вт/м^2 [21].

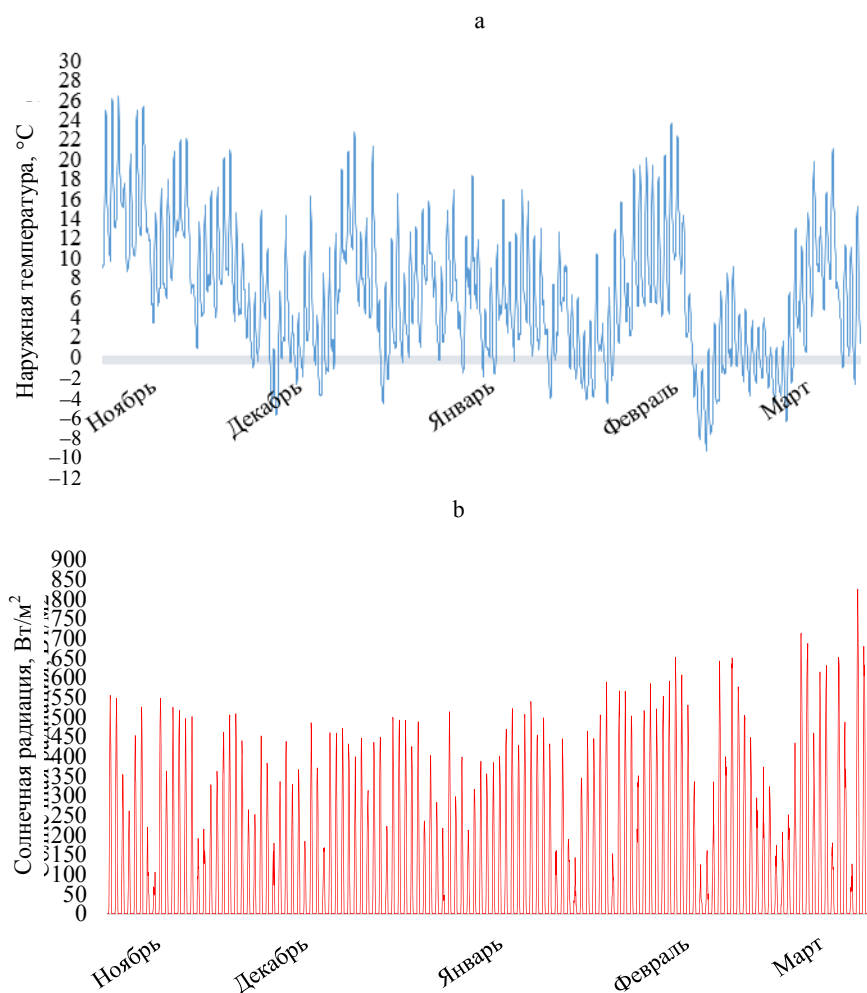


Рис. 1. Динамика изменения температуры наружного воздуха в г. Карши (а)
и падающей солнечной радиации на горизонтальную поверхность (б)

Fig. 1. Dynamics of temperature change in the city of Karshi (a) and solar radiation incidence on a horizontal surface (b)

На рис. 2 приведены схема двухскатной теплицы (а) и изменение азимутального угла поверхности для разных ее частей (б). Для каждой стороны теплицы рассчитано максимальное падение солнечной радиации. Для определения ориентации и конструктивных размеров построена 3D модель солнечной двухскатной теплицы (рис. 3).

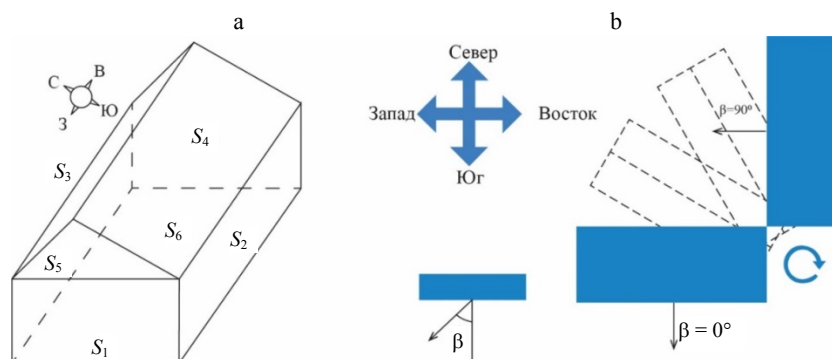


Рис. 2. Схема двухскатной теплицы (а) и изменение азимутального угла поверхности для разных ее частей (б)

Fig. 2. Diagram of a gable greenhouse (a) and change in the azimuth angle of the surface for different parts of the greenhouse (b)

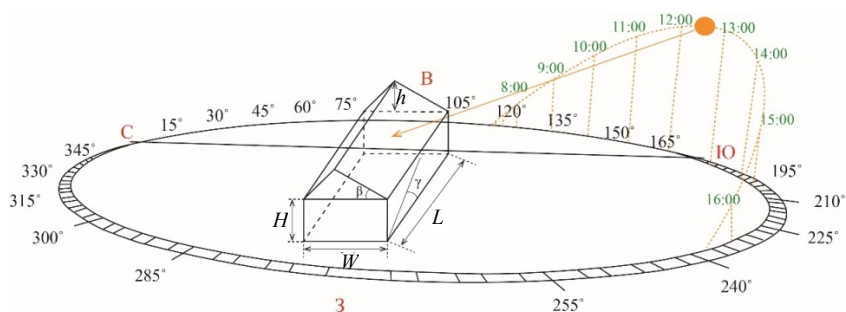


Рис. 3. Трехмерная модель определения ориентации и конструктивных размеров солнечной теплицы

Fig. 3. Three-dimensional model for determining the optimal orientation and design dimensions of a solar greenhouse

Методика определения воспринимаемой теплицей солнечной энергии

Математические выражения расчета конструктивных размеров солнечной теплицы представляются в виде:

$$S_1 = S_4 = WH + \frac{Wh}{2}; \quad (1)$$

$$S_2 = S_5 = LH; \quad (2)$$

$$S_3 = S_6 = dL = \frac{WL}{2\operatorname{tg}\beta}; \quad (3)$$

$$V = WL \left(H + \frac{h}{2} \right); \quad (4)$$

$$k_i = \frac{L_i}{W_i}, \quad 1 \leq k_i \leq 12,5; \quad (5)$$

$$\beta_i = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{1,5 \cdot 2}{W_i} \right), \quad (23^\circ \leq \beta_i \leq 56^\circ). \quad (6)$$

Здесь $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ – площади поверхностей элементов теплицы и угол наклона поверхности β .

Известно, что видимое положение солнца относительно плоскости земли изменяется в зависимости от нескольких геометрических параметров. Угол склонения солнца δ относительно выбранного дня n определяется из уравнения [22]

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360(n + 284)}{365} \right). \quad (7)$$

В табл. 1 представлен алгоритм определения числа выбранного дня в месяце, который понадобится при определении угла склонения солнца, и показатели углов склонения солнца.

Часовые углы восхода и заката определяются из выражения [23]

$$\omega_{1,2} = \pm \arccos(-\operatorname{tg}\phi \operatorname{tg}\delta). \quad (8)$$

Таблица 1

Алгоритм определения числа дней в месяце
Algorithm for determining the number of days in a month

Месяц	Выбор количества дней в месяце	Номер выбранного дня месяца	Номер выбранного дня года n	Угол склонения солнца δ
Январь	i	17	17	$-20,9$
Февраль	$31 + i$	16	47	$-13,0$
Март	$59 + i$	16	75	$-2,4$
Апрель	$90 + i$	15	105	$9,4$
Май	$120 + i$	15	135	$18,8$
Июнь	$151 + i$	11	162	$23,1$
Июль	$181 + i$	17	198	$21,2$
Август	$212 + i$	16	228	$13,5$
Сентябрь	$243 + i$	15	258	$2,2$
Октябрь	$273 + i$	15	288	$-9,6$
Ноябрь	$304 + i$	14	318	$-18,9$
Декабрь	$334 + i$	10	344	$-23,0$

На наклонных поверхностях с различной ориентацией часовая солнечная радиация рассчитывалась с помощью простых геометрических соотношений между горизонтальной и наклонной поверхностями, а диффузная часовая солнечная радиация – с использованием модели Луи и Джордана. Суммарная солнечная радиация, падающая на каждую поверхность солнечной теплицы, является функцией ряда углов: угла падения солнечной радиации на поверхность θ , угла склонения солнца δ , угла солнечных часов ω , угла азимута поверхности (ориентация) γ , угла географической широты расположения теплицы φ и угла наклона поверхности β .

Количество суммарной солнечной радиации, падающей на теплицу, равно суммарной солнечной радиации, падающей на каждую сторону поверхности теплицы:

$$I = \sum I_{hi}(\beta_i, k_i, \gamma_i) S_i. \quad (10)$$

В исследовании использовался изотропный метод определения среднемесячного суммарного солнечного излучения на различных поверхностях солнечной теплицы [24–26], согласно которому имеем

$$I_h = R_b I_b + I_d R_d + \rho_q I_H R_q, \quad (11)$$

где R_b – геометрический фактор (коэффициент наклона); R_d , R_q – коэффициенты, зависящие от угла наклона поверхности β .

Ввиду того что углы восхода и захода солнца меняются в зависимости от угла наклона и азимута, зависимость геометрического фактора R_b от двух часовых углов ω_1 и ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$) выглядит следующим образом [27]:

$$R_b = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta_i d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta_z d\omega} = \frac{a}{b}, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} a = & \frac{\pi}{180} (\sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) (\omega_2 - \omega_1) + \\ & + (\cos \delta \cos \varphi \cos \beta + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) - \\ & - (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma) (\cos \omega_2 - \cos \omega_1); \end{aligned} \quad (13)$$

$$b = \frac{\pi}{180} (\cos \delta \cos \varphi (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) - \sin \delta \sin \varphi (\omega_2 - \omega_1)). \quad (14)$$

Коэффициенты R_d и R_q вычисляются на основе модели Луи и Джордана по следующим формулам [28]:

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2}; \quad (15)$$

$$R_q = \frac{1 - \cos \beta}{2}. \quad (16)$$

Часовой индекс ясности k_T определяется отношением дневной суммы излучения, падающего на горизонтальную поверхность в заданный день, к дневной сумме заатмосферного излучения:

$$k_T = \frac{I_H}{I_0}. \quad (17)$$

Часовое заатмосферное солнечное излучение I_0 рассчитаем по формуле [29]

$$I_0 = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} I_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \times \left[\cos \delta \cos \varphi (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \delta \sin \varphi \right]. \quad (18)$$

Корреляцию функции часового индекса ясности для фактора диффузного солнечного излучения определяем из выражения, разработанного Эрбсом [30] для местностей с географической широтой от 31° до 42° , что соответствует географической широте г. Карши $38,87^\circ$:

$$\frac{I_d}{I_H} = \begin{cases} 1 - 0,09k_T, & \text{если, } 22 \succ k_T; \\ 0,915 - 0,16044k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + \\ + 12,336k_T^4, & \text{если, } 22 \prec k_T \prec 0,8; \\ 0,165, & \text{если, } 22 \succ k_T \succ 0,8. \end{cases} \quad (19)$$

Среднее значение солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность I_b , определяем как разность дневного суммарного излучения I_H и диффузного излучения I_d

$$I_b = I_H - I_d. \quad (20)$$

Суммарное солнечное излучение, достигающее каждой поверхности солнечной теплицы, состоит из прямого, диффузного и отраженного. В целом проницаемость покрытия для каждой поверхности теплицы для этих трех компонентов разная и во многом зависит от оптических свойств материала покрытия. Эти оптические свойства включают угол преломления света θ_2 , коэффициент затухания K для стекла 32 м^{-1} и толщину покры-

тия L , равную 10 мм. Коэффициент пропускания солнечного света [31] определяется математическим выражением следующего вида:

$$r = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right) \left[\frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \right]; \quad (21)$$

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_i)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_i)}; \quad (22)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_i)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_i)}. \quad (23)$$

Здесь угол преломления луча θ_2 является функцией угла падения солнечного света θ_i , а показатель преломления среды n_2 рассчитывается по закону Снелла следующим образом (для воздуха $n_1 = 1$ и для стекла $n_2 = 1,53$):

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_2. \quad (24)$$

Для диффузного солнечного излучения и солнечного излучения, отраженного от почвы, θ_i заменяется соответствующими средними углами падения θ_d и θ_g , которые являются функцией угла наклона поверхности β , как показано ниже [32]:

$$\theta_d = 59,7 - 0,1388\beta + 0,001497\beta^2; \quad (25)$$

$$\theta_g = 90 - 0,5788\beta + 0,002693\beta^2. \quad (26)$$

Часть суммарного солнечного излучения I_h , получаемого покрытием солнечной теплицы, отражается в воздух ρI_h , а оставшаяся часть поступает внутрь теплицы, где попадает на посевную площадь или на ее различные части конструкции. Внутренняя часть тепличного покрытия разделена на два вида компонентов, которые отражаются либо в тепличную систему, либо через покрытие в воздух. При этом, если предположить, что в теплице нет растений, часть того, что попадает на тепличную посевную площадь, поглощается почвой и теряется под землей, а остальная часть отражается в теплицу посредством конвекции, испарения и излучения. Части солнечного излучения (от посевной земли и стен), возвращаемые в тепличную среду, вызывают парниковый эффект и повышают температуру воздуха. Доля солнечной радиации, поглощаемой посевной землей, является основным фактором парниковых температур и парникового эффекта, поэтому учет этого эффекта приводит к снижению требуемого количества энергии при моделировании процесса выращивания продуктов в теплице. На рис. 4 показана схема попадания солнечного света и его распределение в теплице.

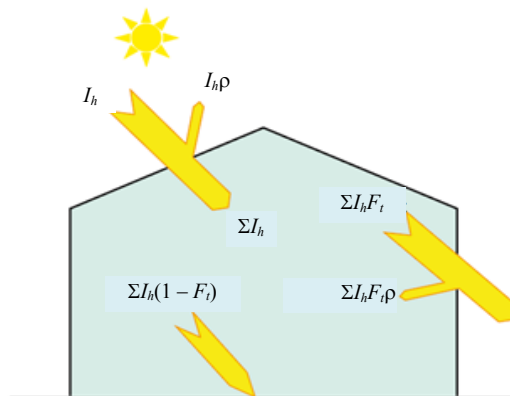


Рис. 4. Схема рассеивания солнечного света в теплице

Fig. 4. Scheme of sunlight diffusion in a greenhouse

Основываясь на расчетной проводимости различных компонентов солнечного излучения, часть солнечного излучения, передаваемого между часовыми углами ω_1 и ω_2 внутри парника I_h , можно вычислить следующим образом [33]:

$$\Sigma I_h = S_i (I_b R_b \tau_b + I_d R_d \tau_d + \rho_q I_H R_q \tau_q). \quad (27)$$

Согласно распределению солнечного излучения в теплице, описанному на схеме (рис. 4), солнечный свет, попадающий в теплицу, состоит из двух частей: той части солнечного излучения, которая достигает Земли I_1 , и той части света, которая отражается от поверхностей солнечной теплицы I_2 . Общее количество суммарной солнечной радиации, передаваемой в тепличной системе, выражается как:

$$\Sigma I = I_1 + I_2; \quad (28)$$

$$I_1 = \Sigma I_h (1 - F_t); \quad (29)$$

$$I_2 = \Sigma I_h \rho F_t. \quad (30)$$

Общая солнечная доля F_t изменяется каждый час дня и уменьшается с увеличением размера (длины) посевной площади для всех типов теплиц. Общая солнечная доля в зимние месяцы для двухскатных теплиц в исследованиях оценивалась в среднем 0.35, а коэффициент отражения света (ρ) – 0.1 [34].

На основе представленных зависимостей разработан алгоритм численного моделирования, позволяющий определить максимальную суммарную падающую солнечную радиацию на двухскатную теплицу.

Результаты и обсуждение

Для расчета количества суммарной часовой солнечной радиации, воспринимаемой теплицей в любое время года в г. Карши, в программе MATLAB R2023b разработан скрипт (а) и проведен регрессионный анализ (б) (рис. 5). При этом входные параметры зависят от: выбранного дня,

угла наклона поверхности, широты расположения теплицы, ориентации, коэффициента отражения света почвой, доли солнечного излучения и падения солнечного света на горизонтальную поверхность.

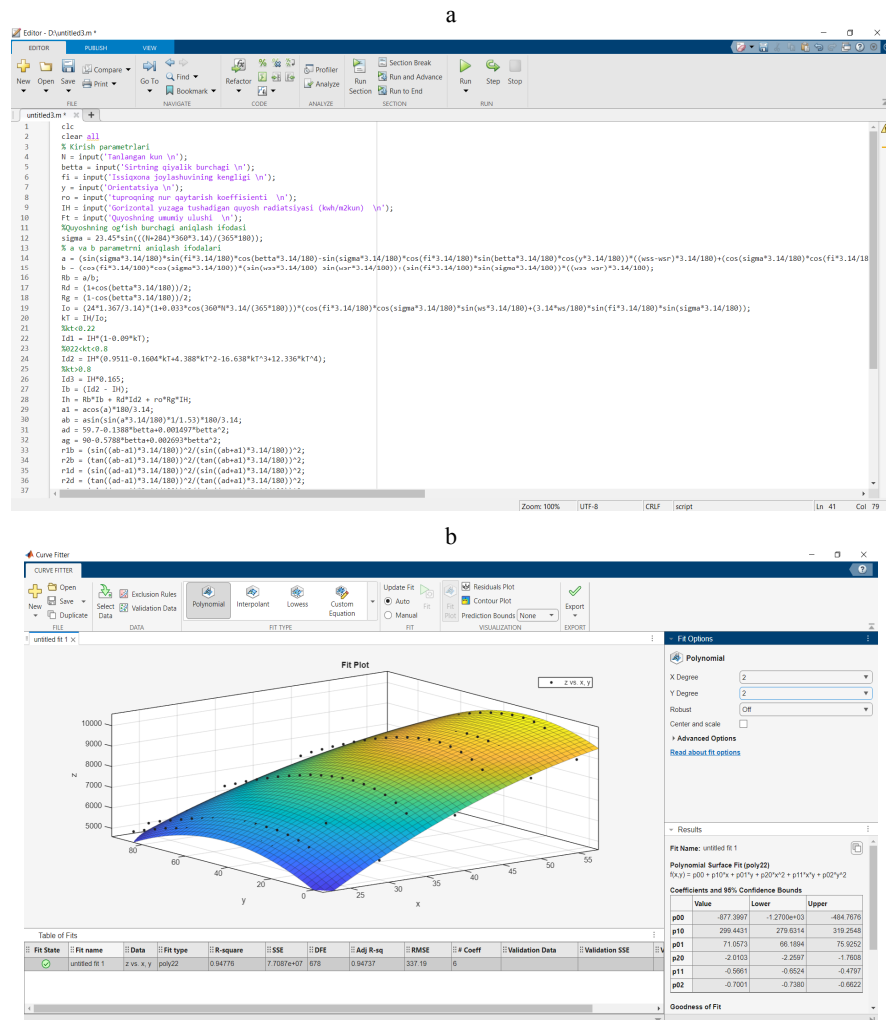


Рис. 5. Скрипт, разработанный в MATLAB R2023b (а), и регрессионный анализ (б)

Fig. 5. Script developed in MATLAB R2023b (a) and regression analysis (b)

На рис. 6 показано, как максимальное суммарное среднесуточное солнечное излучение, падающее на двухскатную теплицу с полезной площадью 50 м^2 , моделируется на основе регрессионного анализа в пакете MATLAB с учетом зависимости угла наклона теплицы и ориентации за ноябрь (а), декабрь (б), январь (с), февраль (д) и март (е). При этом численные значения средней суммарной солнечной радиации теплицы для ноября, декабря, января, февраля и марта представлены в табл. 2.

В результате моделирования определены оптимальные параметры теплицы для вышеприведенного периода: азимутальный угол поверхности $\gamma_{\text{опт}} = 45^\circ$, ее угол наклона $\beta_{\text{опт}} = 50^\circ$, максимальная суммарная солнечная радиация за данный период составляет $\sum I_{\text{max}} = 35660 \text{ МДж}$.

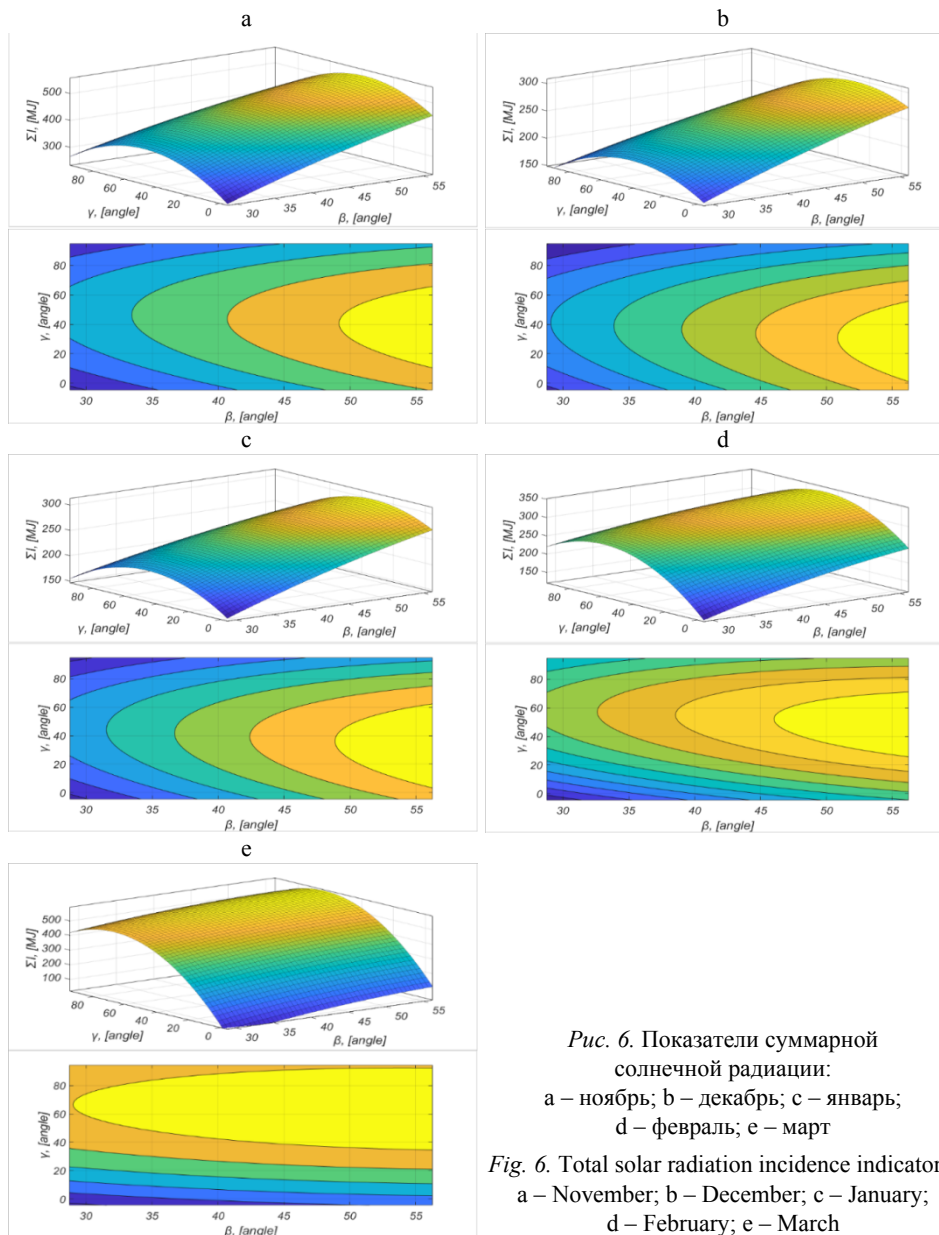


Рис. 6. Показатели суммарной
солнечной радиации:
а – ноябрь; б – декабрь; с – январь;
д – февраль; е – март
Fig. 6. Total solar radiation incidence indicators:
a – November; b – December; c – January;
d – February; e – March

Таблица 2

Средняя суммарная солнечная радиация
Average total solar radiation incidence

Месяц	Азимутальный угол поверхности $\gamma_1, ^\circ$	Угол наклона поверхности β_1 , град.	Средняя суммарная солнечная радиация ΣI_{YQR1} , МДж/мес.
Ноябрь	40	52	4617
Декабрь	30	53	9502
Январь	38	52	8641
Февраль	52	52	8343
Март	65	41	4559

На рис. 7 показаны результаты сравнения суммарной солнечной радиации, падающей на стандартную ($\beta = 60^\circ$; $\gamma = 0^\circ$) и предложенную нами ($\beta = 50^\circ$, $\gamma = 45^\circ$) теплицы с одинаковыми конструктивными размерами. Из графика видно, что в период с 15 ноября по 15 марта на предложенную нами теплицу будет приходиться в общей сложности 35660 МДж солнечной радиации, а на стандартную теплицу – 28600 МДж, т. е. предложенная теплица позволяет повысить ее энергоэффективность на 20 %.

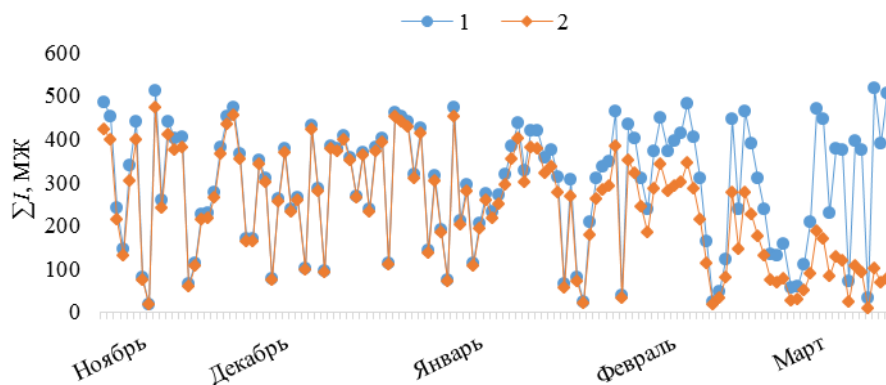


Рис. 7. Результаты сравнения двух теплиц стандартной и разработанной:

- 1 – результаты, полученные при оптимизации;
2 – то же, полученные в стандартном положении

Fig. 7. Results of comparison of two greenhouses, viz. the standard one and the developed one:
1 – the results obtained during optimization; 2 – the results obtained in the standard position

ВЫВОДЫ

1. Моделирование режимов функционирования солнечной теплицы, выполненное в пакете MATLAB с учетом изменения параметров окружающей среды местности в период с 15 ноября 2023 г. по 15 марта 2024 г. для г. Карши ($38,87^\circ$ географическая широта и $65,80^\circ$ долгота, ориентация от 0 до 90° с интервалом 5°), позволило установить ее оптимальные параметры: азимутальный угол поверхности, равный $\beta_{\text{опт}} = 50^\circ$, максимальную суммарную солнечную радиацию за данный период, которая составила 35660 МДж, что на 20 % выше по сравнению со стандартным вариантом ($\beta = 60^\circ$; $\gamma = 0^\circ$) с одинаковыми конструктивными размерами.

2. Обобщение результатов моделирования позволило разработать методику определения геометрических характеристик (размеров и параметров ориентации) солнечных двухскатных теплиц по заданным климатическими условиями по критерию максимизации падающей суммарной солнечной радиации в зимний период года, которая может быть распространена для применения на другие регионы Узбекистана с целью повышения энергоэффективности агропромышленного сектора

Обозначения:

S_i – площадь падающей солнечной радиации в теплицу, м^2 ; I_H – суммарная солнечная радиация, падающая на горизонтальную поверхность, $\text{Вт}/\text{м}^2$; n – номер выбранного дня; k_i – отношение ширины основания теплицы к ее длине, коэффи-

коэффициенты ограждения; δ – угол склонения солнца, град.; β – угол наклона поверхности, град.; θ – угол падения солнечной радиации на поверхность, град.; γ – азимутальный угол поверхности (ориентация), град.; φ – широта расположения теплицы, град.; I_{SC} – внеземное солнечное излучение, Вт/м²; k_T – коэффициент прозрачности; F_t – общая солнечная доля, коэффициент; ρ_g – коэффициент отражения света для почвы; V – объём теплицы, м³; W – ширина основания теплицы, м; H – высота стен теплицы, м; h – высота крыши теплицы, м; L – длина основания теплицы, м;

Научная работа поддержана со стороны фундаментального проекта, реализованного в рамках узбекско-белорусского сотрудничества IL-4821091659 «Разработка научно-технических основ гибридных систем теплоснабжения с учетом метеорологических особенностей климата местности» в 2022–2024 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое моделирование комбинированной системы теплоснабжения солнечного дома / Г. Н. Узаков, В. Л. Червинский, У. Х. Ибрагимов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-412-421>.
2. Седнин, А. В. Проблемы развития гибридных систем теплоснабжения / А. В. Седнин, К. М. Дюсенов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188>.
3. CFD-моделирование аэродинамического профиля лопастей ветроэнергетической установки с вертикальной осью в системе Ansys Fluent / Г. Н. Узаков, В. А. Седнин, А. Б. Сафаров [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 97–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-97-114>.
4. Safarov, A. B. Autonomous Heat-Cooling and Power Supply System Based on Renewable Energy Devices (Trigeneration System) / A. B. Safarov, O. I. Rakhmatov, Y. G. Uzakova // BIO Web of Conferences. 2023. Vol. 71. P. 02030. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102030>.
5. Development of a System for Modeling the Design and Optimization of the Operation of a Small Hydroelectric Power Station / G. N. Uzakov, Z. E. Kuziev, A. B. Safarov, R. A. Mamedov // Digital and Information Technologies in Economics and Management. DITEM 2023 / ed. A. Gibadullin. Springer, Cham, 2024. P. 243–252. (Lecture Notes in Networks and Systems; vol. 942). https://doi.org/10.1007/978-3-031-55349-3_20.
6. Sethi, V. P. On the Selection of Shape and Orientation of a Greenhouse: Thermal Modeling and Experimental Validation / V. P. Sethi // Solar Energy. 2009. Vol. 83, № 1. P. 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.018>.
7. Çakır, U. Using Solar Greenhouses in Cold Climates and Evaluating Optimum Type According to Sizing Position and Location: A Case Study / U. Çakır, E. Şahin // Computers and Electronics in Agriculture. 2015. Vol. 117. P. 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.005>.
8. Chen J. A Mathematical Model of Global Solar Radiation to Select the Optimal Shape and Orientation of the Greenhouses in Southern China / J. Chen, Y. Ma, Z. Pang // Solar Energy. 2020. Vol. 205, № 6. P. 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.055>.
9. Dragichevich, S. M. Determining the Optimum Orientation of a Greenhouse on the Basis of the Total Solar Radiation Availability / S. M. Dragichevich // Thermal science. 2011. Vol. 15, № 1. P. 215–221. <https://doi.org/10.2298/tsci100220057d>.
10. Effects of Orientation and Structure on Solar Radiation Interception in Chinese Solar Greenhouse / D. Xu, Y. Li, Y. Zhang [et al.] // PLOS ONE. 2020. Vol. 15, № 11. Art. e0242002. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242002>.
11. Optimal Solar Greenhouses Design Using Multiobjective Genetic Algorithm / B. M. Karambasti, M. Naghashzadegan, M. Ghodrat, A. Lalbakhsh // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 73728–73742. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3189348>.
12. A comparative study of greenhouse shapes and orientations under the climatic conditions of Marrakech, Morocco / A. Mellalou, A. Mouaky, A. Bacaoui, A. Outzourhit // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 19. P. 6045–6056. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03556-z>.
13. Пенджиев, А. М. Математическая модель расчета температурного режима листа в условиях солнечной теплицы / А. М. Пенджиев // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 11. С. 65–68.

14. Вардиашвили, А. Б. Гидравлический и теплотехнический расчет подпочвенной аккумуляющей системы гелиотеплиц / А. Б. Вардиашвили, В. Д. Ким // Гелиотехника. 1980. № 6. С. 48–53.
15. Modeling the Heat Balance of a Solar Greenhouse with a Passive Heat Accumulator / A. G. Khalimov, B. E. Khairiddinov, V. D. Kim, G. G. Khalimov // *Applied Solar Energy*. 2013. Vol. 49, No 4. P. 211–214. <https://doi.org/10.3103/S0003701X13040063>.
16. Study of the Thermal Regime of Solar Greenhouses for the Individual Purpose for Their Design Features / Sh. I. Klychev, B. S. Rasakhodzhaev, Zh. Z. Akhadov [et al.] // *Applied Solar Energy*. 2022. Vol. 58, No. 1. P. 121–126. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22010091>.
17. Akhatov, J. S. Numerical Calculations of Heat Engineering Parameters of a Solar Greenhouse Dryer / J. S. Akhatov, A. S. Halimov // *Applied Solar Energy*. 2015. Vol. 51, No 2. P. 107–111. <https://doi.org/10.3103/S0003701X15020024>.
18. Samiev, K. A. Study of the Performance of Greenhouse with Short Term Heat Storage and Night Insulation / K. A. Samiev, J. S. Akhatov // *Proceedings of the ISES Solar World Congress*, 2011. P. 826–830. <https://doi.org/10.18086/swc.2011.15.11>.
19. Investigation of Solar Greenhouses with Transformable (Adjustable) Body Depending on Indoor and Outdoor Air Temperature / B. S. Rasakhodzhaev, U. Z. Akhmadjanov, M. O. Bo-boeva [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1070, No 1. Art. 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012030>.
20. About the Production of Lemons Grown in an Autonomous Gabled Solar Greenhouse / I. A. Yuldashev, B. M. Botirov, N. S. Kholmirezayev, Y. M. Qurbanov // *Applied Solar Energy*. 2023. Vol. 59, No 1. P. 44–47. <https://doi.org/10.3103/S0003701X23600431>.
21. Nasa Power. Data Access Viewer (DAV). URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>.
22. Assessment of Solar Radiation on Diversely Oriented Surfaces and Optimum Tilts for Solar Absorbers in Malaysian Tropical Latitude / K. M. Ng, N. M. Nor Mariah Adam, O. Inayatullah, M. Z. Ab Kadir // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2014. Vol. 5, No 1. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0075-7>.
23. Kendirli, B. Structural Analysis of Greenhouses: A Case Study in Turkey / B. Kendirli // *Building and Environment*. 2006. Vol. 41. P. 864–871. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.013>.
24. Hailu, G. Optimum Tilt Angle and Orientation of Photovoltaic Thermal System for Application in Greater Toronto Area, Canada / G. Hailu, A. S. Fung // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No 22. P. 6443. <https://doi.org/10.3390/su11226443>.
25. Gheyrati, M. Optimum Orientation of the Multi-Span Greenhouse for Maximum Capture of Solar Energy in Central Region of Iran / M. Gheyrati, A. Akram, H. Ghasemi-Mobtaker // *Journal of Renewable Energy and Environment*. 2022. Vol. 9, No. 3. P. 65–74. <https://doi.org/10.30501/jree.2022.305780.1259>.
26. Gairaa, K. Maximisation and Optimisation of the Total Solar Radiation Reaching the Solar Collector Surfaces / K. Gairaa // *Progress in Clean Energy* / eds.: I. Dincer, C. Colpan, O. Kizilkan, M. Ezan. Springer, Cham, 2015. Vol. 2. P. 873–886. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17031-2_57.
27. Duffie, J. A. *Solar Engineering of Thermal Processes* / J. A. Duffie, W. A. Beckman. New Jersey: John Wiley & Son, 2013. 944 p. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
28. Optimization of Angle of Inclination of the Hybrid Photovoltaic-Thermal Solar Collector Using Particle Swarm Optimization Algorithm / T. Ismail, K. Touafek, N. Bellel, N. Bouarroudj // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2014. Vol. 6, iss. 5. Art. 053116. <https://doi.org/10.1063/1.4896956>.
29. Jafarkazemi, F. Optimum Tilt Angle and Orientation of Solar Surfaces in Abu Dhabi, UAE / F. Jafarkazemi, A. S. Saadabadi // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 56. P. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.036>.
30. Singh, R. D. Energy conservation in the greenhouse system: A steady state analysis / R. D. Singh, G. N. Tiwari // *Energy*. 2010. Vol. 35, iss. 6. P. 2367–2373. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.003>.
31. Solar Energy Conservation in Greenhouse: Thermal Analysis and Experimental Validation / H. G. Mobtaker, Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, M. Matloobi // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 96, Part A. P. 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.079>.
32. Optimum Design and Orientation of a Greenhouse for Seasonal Winter Drying in Morocco under Constant Volume Constraint / A. Mellalou, W. Riad, A. Mouaky [et al.] // *Solar Energy*. 2021. Vol. 230. P. 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.050>.

33. El-Maghlany, W. M. Optimum Design and Orientation of the Greenhouses for Maximum Capture of Solar Energy in North Tropical Region / W. M. El-Maghlany, M. A. Teamah, H. Tanaka // *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 105. P. 1096–1104. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.066>.
34. Karambasti, B. M. Optimum Design of a Greenhouse for Efficient use of Solar Radiation Using a Multi-Objective Genetic Algorithm / B. M. Karambasti // *Energy Efficiency*. 2022. Vol. 15, № 8. Art. 66. <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10073-6>.

Поступила 14.01.2025 Подписана в печать 18.03.2025 Опубликовано онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Uzakov G. N., Charvinski V. L., Ibragimov U. Kh., Khamraev S. I., Kamolov B. I. (2022) Mathematical Modeling of the Combined Heat Supply System of a Solar House. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-412-421> (in Russian).
2. Sednin A. V., Dyussenov K. M. (2024) Development of Hybrid District Heating Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188> (in Russian).
3. Uzakov G. N., Sednin V. A., Safarov A. B., Mamedov R. A., Khatamov I. A. (2024) CFD-Modeling of the Airfoil of the Blades of a Wind Power Plant with a Vertical Axis in the Ansys Fluent System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 97–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-97-114> (in Russian).
4. Safarov A. B., Rakhmatov O. I., Uzakova Y. G. (2023) Autonomous Heat-Cooling and Power Supply System Based on Renewable Energy Devices (Trigeneration System). *BIO Web of Conferences*, 71, 02030. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102030>.
5. Uzakov G. N., Kuziev Z. E., Safarov A. B., Mamedov R. A. (2024) Development of a System for Modeling the Design and Optimization of the Operation of a Small Hydroelectric Power Station. Gibadullin A. (ed.). *Digital and Information Technologies in Economics and Management. DITEM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, 942, p. 243–252. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55349-3_20.
6. Sethi V. P. (2009) On the Selection of Shape and Orientation of a Greenhouse: Thermal Modeling and Experimental Validation. *Solar Energy*, 83 (1), 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.soler.2008.05.018>.
7. Çakır U., Şahin E. (2015) Using Solar Greenhouses in Cold Climates and Evaluating Optimum Type According to Sizing, Position and Location: A Case Study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 117, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.005>.
8. Chen J., Ma Y., Pang Z. (2020) A Mathematical Model of Global Solar Radiation to Select the Optimal Shape and Orientation of the Greenhouses in Southern China. *Solar Energy*, 205 (6), 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.055>.
9. Dragichevich S. M. (2011) Determining the Optimum Orientation of a Greenhouse on the Basis of the Total Solar Radiation Availability. *Thermal Science*, 15 (1), 215–221. <https://doi.org/10.2298/tsci100220057d>.
10. Xu D., Li Y., Zhang Y., Xu H., Li T. (2020) Effects of Orientation and Structure on Solar Radiation Interception in Chinese Solar Greenhouse. *PLOS ONE*, 15 (11), e0242002. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242002>.
11. Karambasti B. M., Naghashadegan M., Ghodrat M., Lalbakhsh A. (2022) Optimal Solar Greenhouses Design Using Multiobjective Genetic Algorithm. *IEEE Access*, 10, 73728–73742. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3189348>.
12. Mellalou A., Mouaky A., Bacaoui A., Outzourhit A. A (2022) Comparative Study of Greenhouse Shapes and Orientations Under the Climatic Conditions of Marrakech, Morocco. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 6045–6056. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03556-z>.
13. Penjiyev A. M. (2010) Mathematical Model of Sheet Temperature Mode Calculation in Hot-House Conditions. *International Scientific Journal for alternative energy and Ecology (IS-JAEE)*, (11), 65–68 (in Russian).
14. Vardiashvili A. B., Kim V. D. (1980) Hydraulic and Thermal Calculation of the Subsoil Storage System of Solar Greenhouses. *Geliotekhnika*, (6), 48–53 (in Russian).

15. Khalimov A. G., Khairiddinov B. E., Kim V. D., Khalimov G. G. (2013) Modeling the Heat Balance of a Solar Greenhouse with a Passive Heat Accumulator. *Applied Solar Energy*, 49 (4). 211–214. <https://doi.org/10.3103/S0003701X13040063>.
16. Klychev S. I., Rasakhodzhaev B. S., Akhadov, Z. Z., Akhmadjonov U. Z., Adylov Ch. A. (2022) Study of the Thermal Regime of Solar Greenhouses for the Individual Purpose for Their Design Features. *Applied Solar Energy*, 58 (1), 121–126. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22010091>.
17. Akhatov Z. S., Khalimov A. S. (2015) Numerical Calculations of Heat Engineering Parameters of a Solar Greenhouse Dryer. *Applied Solar Energy*, 51 (2), 107–111. <https://doi.org/10.3103/S0003701X15020024>.
18. Samiev K. A., Akhatov J. S. (2011) Study of the Performance of Greenhouse with Short Term Heat Storage and Night Insulation. *Proceedings of the ISES Solar World Congress*, 826–830. <https://doi.org/10.18086/swc.2011.15.11>.
19. Rasakhodzhaev B. S., Akhmadjanov U. Z., Boboeva M. O., Mashrapova I. R., Tokonova T. S. (2022) Investigation of Solar Greenhouses with Transformable (Adjustable) Body Depending on Indoor and Outdoor Air Temperature. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1070 (1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012030>.
20. Yuldashev I. A., Botirov B. M., Kholmirezayev N. S., Qurbanov Y. M. (2023) About the Production of Lemons Grown in an Autonomous Gabled Solar Greenhouse. *Applied Solar Energy*, 59 (1), 44–47. <https://doi.org/10.3103/S0003701X23600431>.
21. *Nasa Power. Data Access Viewer (DAV)*. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>.
22. Ng K. M., Adam N. M., Inayatullah O., Kadir A. (2014) Assessment of Solar Radiation on Diversely Oriented Surfaces and Optimum Tilts for Solar Absorbers in Malaysian Tropical Latitude. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5 (1). <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0075-7>.
23. Kendirli B. (2006) Structural Analysis of Greenhouses: A Case Study in Turkey. *Building and Environment*, 41, 864–871. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.013>.
24. Hailu G., Fung A.S. (2019) Optimum Tilt Angle and Orientation of Photovoltaic Thermal System for Application in Greater Toronto Area, Canada. *Sustainability*, 2019, 11 (22), 6443. <https://doi.org/10.3390/su11226443>.
25. Gheyraati M., Akram A., Ghasemi-Mobtaker H. (2022) Optimum Orientation of the Multi-Span Greenhouse for Maximum Capture of Solar Energy in Central Region of Iran. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 9 (3), 65–74. <https://doi.org/10.30501/jree.2022.305780.1259>.
26. Gairaa K., Khellaf A., Chellali F., Benkacali S., Bakelli Y., Bezari S. (2015) Maximisation and Optimisation of the Total Solar Radiation Reaching the Solar Collector Surfaces. Dincer I., Colpan C., Kizilkan O., Ezan M. (eds.) *Progress in Clean Energy. Vol. 2*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17031-2_57.
27. Duffie J. A., Beckman W. A. (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Son, New Jersey. 910 <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
28. Tabet I., Touafek K., Bellel N., Bouarroudj N., Khelifa A., Adouane M. (2014). Optimization of Angle of Inclination of the Hybrid Photovoltaic-Thermal Solar Collector Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6 (5), 053116. <https://doi.org/10.1063/1.4896956>.
29. Jafarkazemi F., Saadabadi A. S. (2013) Optimum Tilt Angle and Orientation of Solar Surfaces in Abu Dhabi, UAE. *Renewable Energy*, 2013, 56, 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.036>.
30. Singh R. D., Tiwari G. N. (2010) Energy Conservation in the Greenhouse System: A Steady State Analysis. *Energy*, 2010, 35 (6), 2367–2373. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.003>.
31. Mobtaker H. G., Ajabshirchi Y., Ranjbar S. F., Matloobi M. (2016) Solar Energy Conservation in Greenhouse: Thermal Analysis and Experimental Validation. *Renewable Energy*, 96 (A), 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.079>.
32. Mellalou A., Riad W., Mouaky A., Bacaoui A., Outzourhit A. (2021) Optimum Design and Orientation of a Greenhouse for Seasonal Winter Drying in Morocco under Constant Volume Constraint. *Solar Energy*, 230, 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.050>.
33. El-Maghlany W. M., Teamah M. A., Tanaka H. (2015) Optimum Design and Orientation of the Greenhouses for Maximum Capture of Solar Energy in North Tropical Region. *Energy Conversion and Management*, 105, 1096–1104. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.066>.
34. Mahjoob Karambasi B., Ghodrati M., Naghashzadegan M., Ghorbani G. Optimum Design of a Greenhouse for Efficient Use of Solar Radiation Using a Multi-objective Genetic Algorithm. *Energy Efficiency*, 15 (8), 66. <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10073-6>.