

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА НАКЛОНА СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ПРИМЕРЕ УМЕРЕННО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

А. Г. Михайлов, Ю. А. Анисимов

Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье представлены результаты исследования влияния угла наклона солнечных коллекторов на долю восприятия солнечной радиации в условиях умеренно континентального климата на примере Омской области. Разработан программный комплекс на языке Python, основанный на математической модели, преобразующей значение суммарной солнечной радиации на горизонтальной поверхности в эффективное энергопоступление на наклонную поверхность. Полученные эффективные значения используются для определения оптимального угла наклона, обеспечивающего максимальное поступление энергии с учетом климатических и географических особенностей. Приведены результаты расчета оптимального угла наклона тепловоспринимающей поверхности коллектора для г. Омска в разрезе теплого и холодного периодов. На основе представленных результатов выполнен сравнительный анализ суммарной солнечной радиации при оптимальных углах, рассчитанных программой, и углах, рекомендованных нормами проектирования. Полученные сведения могут быть использованы для определения технико-экономических затрат при реализации новых проектов с более высокой энергоэффективностью.

Ключевые слова: угол наклона, солнечные коллекторы, инсоляция, математическое моделирование, Python, возобновляемые источники энергии.

Для цитирования: Михайлов А. Г., Анисимов Ю. А. Разработка математической модели для определения оптимального угла наклона солнечных коллекторов на примере умеренно континентального климата Омской области // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 3. С. 22–29. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-22-29. EDN: UGWMDV.



© Михайлов А. Г., Анисимов Ю. А., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPING A MATHEMATICAL MODEL TO DETERMINE THE OPTIMAL SOLAR COLLECTOR TILT ANGLE: A CASE STUDY OF THE TEMPERATE CONTINENTAL CLIMATE IN THE OMSK REGION

A. G. Mikhailov, Yu. A. Anisimov

Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

This paper investigates how the tilt angle of solar collectors affects the amount of solar radiation received under moderately continental climate conditions, with a focus on the Omsk region. A Python-based software package has been developed, which utilizes a mathematical model to convert total solar radiation on a horizontal surface into effective energy incident on an inclined plane. The effective energy values derived from the model are then applied to determine the optimal tilt angle that maximizes energy collection while taking into account regional climatic and geographical factors. The study provides a detailed assessment of the optimal tilt angle for the solar collector's heat-absorbing surface in Omsk, analyzing conditions during both warm and cold periods. Furthermore, a comparative analysis is performed between the cumulative solar radiation obtained using the program-calculated optimal angles and the angles suggested by standard design guidelines. The findings from this research offer critical insights into the technical and economic feasibility

of implementing new projects aimed at achieving higher energy efficiency. Overall, the paper presents a comprehensive methodological framework and practical data that could support future developments in solar energy harvesting and energy-efficient design.

Keywords: tilt angle, solar collectors, insolation, mathematical modeling, Python, renewable energy sources.

For citation: Mikhailov A. G., Anisimov Yu. A. Developing a mathematical model to determine the optimal solar collector tilt angle: A case study of the temperate continental climate in the Omsk Region. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 3. P. 22–29. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-22-29. EDN: UGWMDV.



© Mikhailov A. G., Anisimov Yu. A., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Согласно [1], на территории Российской Федерации прогнозируется неуклонный рост городской инфраструктуры, что, безусловно, приведет к увеличению потребления как электрической, так и тепловой энергии. Основным источником энергии, как и прежде, остаются ископаемые виды топлива, ресурс которых исчерпаем. Дефицит традиционных видов топлива в таких условиях является лишь вопросом времени, в контексте чего интеграция возобновляемых источников энергии становится ещё более актуальной, чем прежде. Безусловно, применение тех или иных способов преобразования альтернативной энергии обусловлено как экономическим обоснованием, так и спецификой территориальных и климатических условий. В рамках данной статьи рассмотрена проблема использования солнечной энергии в условиях умеренно континентального климата.

Цель исследования — анализ разработанной математической модели для определения оптимального угла наклона солнечных коллекторов с учетом климатических особенностей Омской области. Стоит также отметить, что разработанная математическая модель позволяет определить оптимальный угол наклона и для других регионов Российской Федерации с иным типом климата.

Определение оптимального угла наклона таких коллекторов позволяет значительно увеличить суммарное поступление энергии и, следовательно, повысить их эффективность. Этот метод является одним из немногих методов, который способствует повышению энергетической эффективности при проектировании и эксплуатации подобных систем, поскольку данные устройства относятся к стандартным сертифицированным устройствам, что не позволяет корректировать их конструктивные характеристики или принцип работы. В работе интегрированы теоретические аспекты расчета инсоляции [4–6], эмпирические данные по региону [2, 3] и результаты численного моделирования.

Анализ существующих положений

Омская область, расположенная в зоне умеренно континентального климата, характеризуется выраженной сезонностью, значительными перепадами температур и неоднородностью распределения солнечного излучения [2, 3]. Климатические особенности Омской области оказывают существенное влияние на эффективность работы солнечных коллекторов. Летний период, характеризующийся высокой инсоляцией, позволяет достигать значительного энергетического эффекта. Однако в зим-

ний период уровень инсоляции значительно снижен вследствие короткого светового дня, низкого угла солнца и наличия снежного покрова. Таким образом, адаптивное регулирование угла наклона, позволяющее скорректировать работу установки к изменяющимся условиям, служит одним из определяющих факторов повышения энергетической эффективности системы преобразования солнечной энергии.

В соответствии с указаниями по эксплуатации из нормативной документации [4, 5], тепловоспринимающие поверхности солнечных коллекторов следует устанавливать при наклоне к горизонту под углом, равным:

— для систем круглогодичного действия — географической широте указанной местности;

— для систем летнего сезонного действия по формуле:

$$\beta = (\varphi + 15^\circ);$$

— для систем зимнего сезонного действия по формуле:

$$\beta = (\varphi - 15^\circ),$$

где β — угол наклона тепловоспринимающей поверхности солнечного коллектора, град.; φ — географическая широта указанной местности, град.

Однако часть исследований, которая рассматривает влияние угла наклона тепловоспринимающей поверхности на суммарную инсоляцию по аналитическим зависимостям [6–8], а также полученные экспериментальные данные [9] свидетельствуют о том, что подобная методика для определения оптимального угла наклона недостаточно эффективна. Стоит также отметить, что, согласно представленным доводам [10] единой аналитической теории, которая позволяет отразить зависимость максимальной солнечной инсоляции на тепловоспринимающей поверхности солнечного коллектора от его угла наклона, — нет. Это связано с тем, что теоретические расчеты и лабораторные эксперименты могут значительно отличаться от реальных условий эксплуатации установок.

Применение аналитических зависимостей целесообразно тогда, когда они учитывают не только географические данные, но и климатические. Одна из таких математических моделей для определения оптимального угла наклона представлена ниже [11–13]. Для полного понимания того, как устроена данная математическая модель, представлены характеристики ориентации поверхности солнеч-

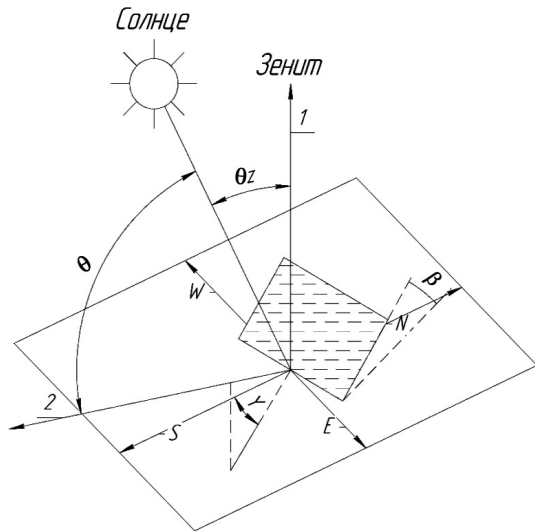


Рис. 1. Характеристики ориентации поверхности солнечного приемника: θ — угол падения солнечных лучей; θ_z — зенитный угол Солнца; β — угол наклона поверхности; γ — азимут; 1 — нормаль к горизонтальной плоскости; 2 — нормаль к наклонной плоскости

Fig. 1. Orientation features of the solar receiver surface: θ — solar incidence angle; θ_z — solar zenith angle; β — surface tilt angle; γ — surface azimuth angle; 1 — normal to the horizontal plane; 2 — normal to the inclined surface

ного приемника относительно сторон света (рис. 1) [14].

Оптимальный угол наклона поверхности β должен определяться таким образом, чтобы за определенный период времени достичь максимальной суммарной инсоляции:

$$\sum_{n_1}^{n_2} I_{\Sigma}^{\beta} \rightarrow \max,$$

где n_1, n_2 — начало и конец временного периода, исчисляемый в часах, днях или месяцах; I_{Σ}^{β} — суммарная инсоляция на наклонную под углом β поверхность, за определенный период времени, МДж/м².

Суммарная инсоляция на наклонную под углом β поверхность определяется по формуле:

$$I_{\Sigma}^{\beta} = I_{dir}^{\beta} + I_{dif}^{\beta} + I_{ref}^{\beta} = I_{dir}^{\beta} \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta} + I_{dif}^{\beta} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho I_{ref}^{\beta} \frac{1 - \cos \beta}{2},$$

где $I_{dir}^{\beta}, I_{dif}^{\beta}, I_{ref}^{\beta}$ — суммарные значения прямой, рассеянной и отраженной от поверхности, расположенной под углом β инсоляции, МДж/м²; $I_{dir}^H, I_{dif}^H, I_{ref}^H$ — суммарные значения прямой, рассеянной и отраженной от горизонтальной поверхности инсоляции, МДж/м²; ρ — коэффициент альbedo отражающей поверхности, который отличается в зависимости от сезона и типа поверхности; β — угол наклона тепловоспринимающей поверхности солнечного коллектора, град.; θ — угол падения солнечных лучей, град.; θ_z — зенитный угол Солнца, град.

Величина угла падения солнечных лучей θ определяется по формуле:

$$\cos \theta = (A - B) \cdot \sin \delta + [C \cdot \sin \omega + (D + E) \cdot \cos \omega] \cdot \cos \delta.$$

$$A = \sin \varphi \cdot \cos \beta,$$

$$B = \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma,$$

$$C = \sin \beta \cdot \sin \gamma,$$

$$D = \cos \varphi \cdot \cos \beta,$$

$$E = \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma,$$

где γ — азимутальный угол установки тепловоспринимающей поверхности солнечного коллектора, град.; φ — географическая широта местности в точке установки панелей, град.; δ — угол склонения солнца, град.; ω — часовой угол солнца, град.

Зенитный угол Солнца определяется по формуле:

$$\theta_z = \arccos[\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega].$$

Угол высоты подъема Солнца над горизонтом определяется по формуле:

$$h = 90^\circ - \theta_z.$$

Азимутальный угол положения Солнца определяется по формуле:

$$\cos Az = \frac{\sin \varphi \cdot \sin h - \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos h}.$$

Временная поправка на уравнение времени определяется по формуле:

$$T_{yb} = \frac{1}{60} \cdot [9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos B - 1,53 \sin(B)].$$

Угол, характеризующий положение Солнца в зависимости от N -дня года:

$$B = \frac{360}{365} (N - 81).$$

Часовой угол определяется по формуле:

$$\omega = 15(t - 12 - T_{yb} - \Delta T_{UTC}) + \psi,$$

где ΔT_{UTC} — разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, ч; ψ — географическая долгота местности в точке установки панелей, град.; t — текущее официальное время, ч.

Угол склонения определяется по формуле:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (N + 284) \right].$$

Углы восхода ω_{sr} и заката ω_{ss} определяются по формуле:

$$\omega_{sr}, \omega_{ss} = 0 \pm \arccos[-\tan \varphi \cdot \tan \delta].$$

Важно отметить, что реальные показатели солнечной инсоляции на единицу площади отличаются от теоретических на величину индекса прозрачности K_T , который в аналитических расчетах определяется по формуле:

$$K_T = \frac{I_{dir}^H + I_{dif}^H + I_{ref}^H}{4921200 \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360N}{365} \right) \right]} \cdot \theta_z.$$

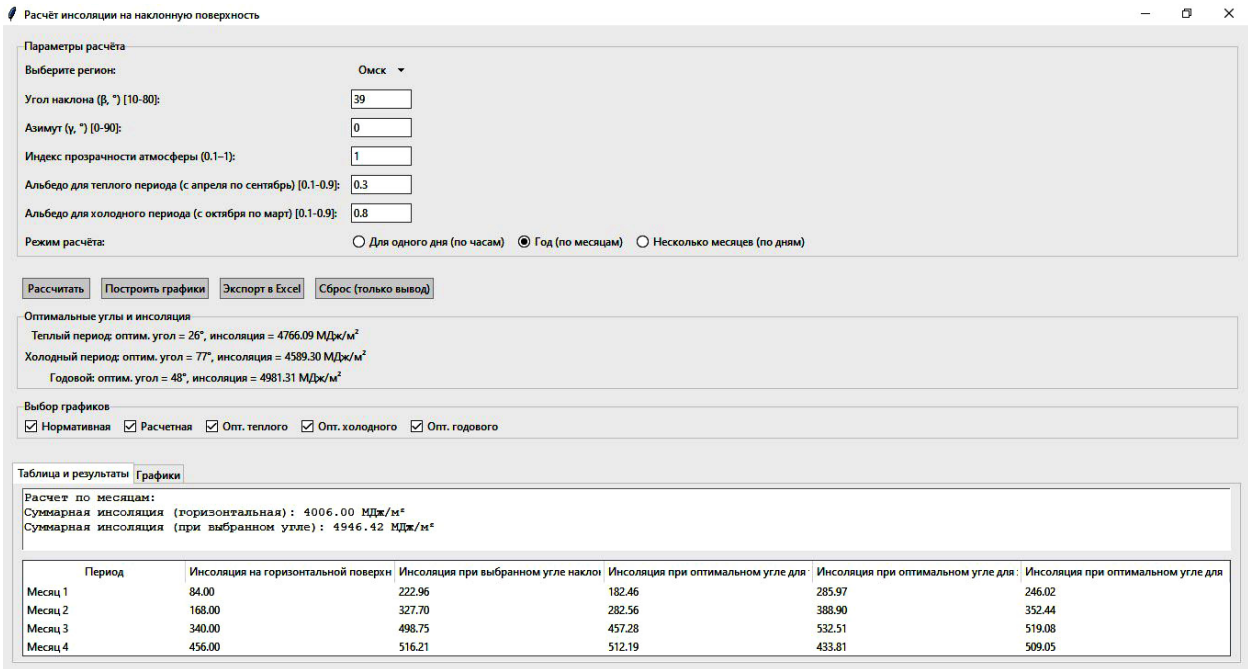


Рис. 2. Графический интерфейс программы для ввода исходных данных и анализа расчета
Fig. 2. Graphical interface for input data and performance analysis

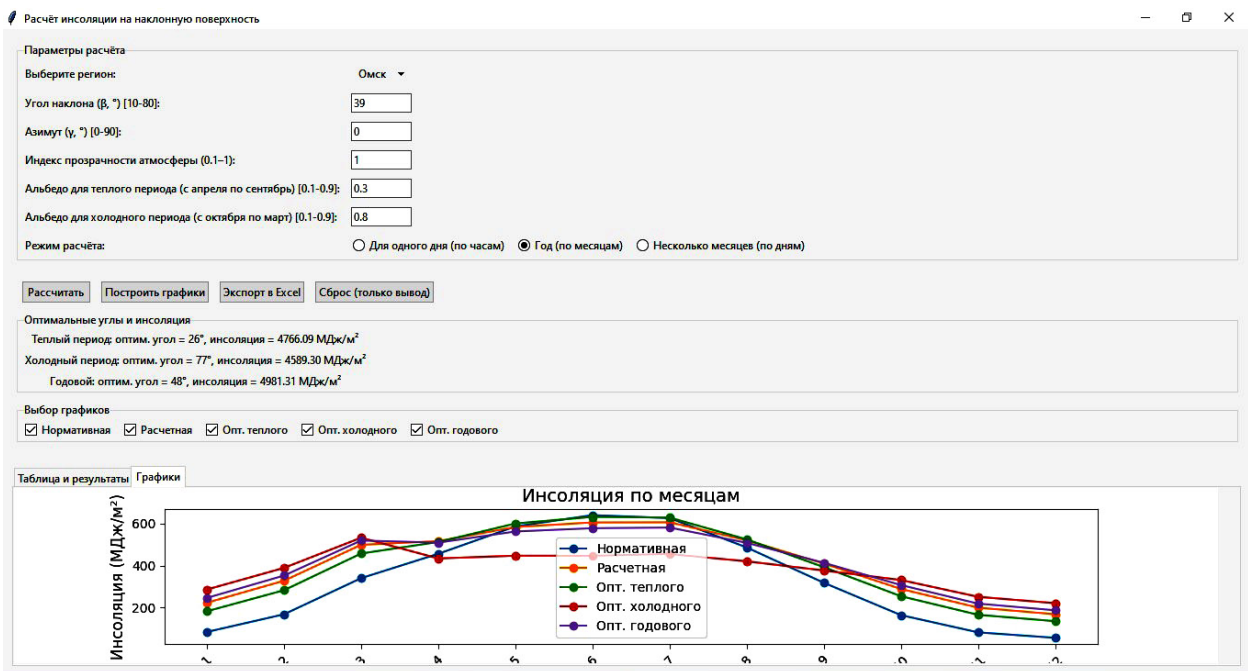


Рис. 3. Графический интерфейс программы для построения графиков суммарной инсоляции
Fig. 3. Graphical interface for plotting total solar irradiation graphs

Представленная выше математическая модель, учитывает наибольшее число географических и климатических характеристик. Для анализа реальных данных об инсоляции, как правило, используются информационные базы данных [15, 16].

Результаты исследования и их обсуждение

Важно подчеркнуть, что на момент проведения исследования открытых российских баз данных об инсоляции нет. При формировании поисковых запросов об инсоляции в браузерах ссылки на официальные российские метеорологические источники отсутствуют. Таким образом, в рамках исследования рассматривались иностранные базы данных,

которые представлены в открытом доступе. Хотя иностранные базы данных [15, 16] и предоставляют достоверные сведения об инсоляции в соответствии с географическими координатами и климатическими характеристиками, сведения об оптимальных углах наклона тепловоспринимающей поверхности такие сервисы не предоставляют. Очевидно, что пользователь с помощью указанных сервисов может определить оптимальный угол наклона самостоятельно, что достигается итеративным пересчетом данных об инсоляции при изменении угла наклона от минимального значения до максимального. Число подобных расчетов может варьироваться от 80 до 320 на одну установку, в зависимости от тре-

Таблица 1. Результаты расчета оптимального угла наклона для г. Омска
 Table 1. Calculation results of the optimal tilt angle for Omsk

Характеристика	Численная величина
Географическая широта, град.	54° 58 г с. ш.
Географическая долгота, град.	73° 23 г в. д.
Азимутальный угол для установки, град.	0°
Индекс прозрачности атмосферы	1,00
Коэффициент альbedo для холодного периода	0,80
Коэффициент альbedo для теплого периода	0,20
Оптимальный угол наклона для холодного периода, град.	77°
Оптимальный угол наклона для теплого периода, град.	26°
Оптимальный угол наклона для нерегулируемой установки, град.	48°
Оптимальный угол наклона для холодного периода в соответствии с нормативной документацией, град.	69°58'
Оптимальный угол наклона для теплого периода в соответствии с нормативной документацией, град.	39°58'
Оптимальный угол наклона для нерегулируемой установки в соответствии с нормативной документацией, град.	54°58'

буемого количества сезонных корректировок угла наклона.

В целях сокращения времени, затрачиваемого на проведение исследований на территории Омской области, был разработан программный комплекс на языке программирования Python [17]. Программа базируется на математической модели, которая была описана ранее, и включает в себя расчет суммарной инсоляции при выбранном угле наклона, а также автоматически определяет оптимальные углы наклона для теплого, холодного и годового периодов с учетом поправок на азимутальный угол установки, индекс прозрачности, коэффициенты альbedo в зависимости от зоны установки и временного периода. Важно отметить, что разработка подобных программных комплексов отражена авторами других работ [13, 18]. Но описанные в этих работах программные решения либо ограничены временными рамками и используемыми для реализации программными модулями [13], либо принимают индекс прозрачности и коэффициенты альbedo как постоянные величины [18]. Ниже представлен графический интерфейс разработанной программы (рис. 2, 3).

После ввода исходных данных программа производит расчет и сводит результаты в таблицу, которая представлена на рис. 2. При необходимости пользователь может выбрать и построить необходимые графические зависимости суммарной инсоляции за определенный период времени. Для дальнейшего анализа может быть осуществлен экспорт в программный комплекс по работе с табличными данными — Microsoft Excel.

К сожалению, интегрировать климатические характеристики в программу с учетом изменения в реальном времени или анализом исторических данных пока не представляется возможным. Интеграция подобных данных подразумевает использование API-ключей, которые предоставляют крупные метеорологические источники [19, 20]. В бесплатном формате предоставляется лишь ограниченный доступ за последние пять суток без возможности прогнозирования или обращения к историческим данным.

Поскольку в статье анализируются данные для определения оптимального угла наклона тепловоспринимающей поверхности солнечного коллектора

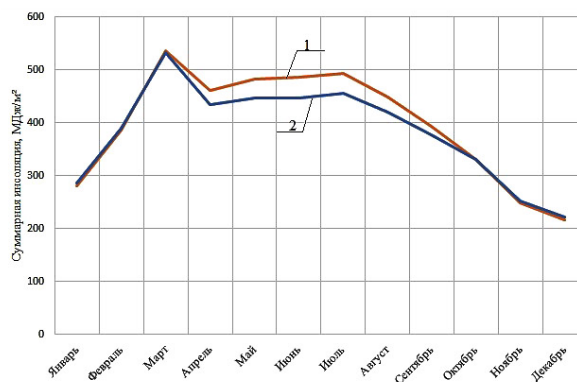


Рис. 4. Графики суммарной инсоляции для холодного периода: 1 — при оптимальном угле, определяемом в соответствии с нормативной документацией; 2 — при оптимальном угле, рассчитываемом программой
 Fig. 4. Graphs of total solar irradiation for the cold period: 1 — at the optimal tilt angle determined per regulatory standards; 2 — at the optimal tilt angle calculated by the program

в условиях умеренно континентального климата, то для примера был выполнен расчет оптимального угла наклона для г. Омска. Представлены результаты расчета в табл. 1.

За холодный период приняты месяцы с октября по март, а за теплый период — с апреля по сентябрь. На основе полученных в ходе расчета данных построены графики суммарной инсоляции при оптимальном угле, который определен в соответствии с нормативной документацией [4, 5], и при оптимальном угле, который определен программой (рис. 4–6).

Сводные результаты расчета суммарной инсоляции при оптимальных углах наклона солнечных коллекторов представлены в табл. 2.

Исходя из результатов расчета, который представлен в табл. 2, можно сделать вывод, что суммарная инсоляция для теплого и холодного периодов, рассчитываемая при оптимальных углах, определяемых по нормативной документации, больше, чем при оптимальных углах, определяемых программой. Данный подход не является до конца верным, поскольку суммарные значения инсоляции при оптимальных углах, рассчитываемых программой,

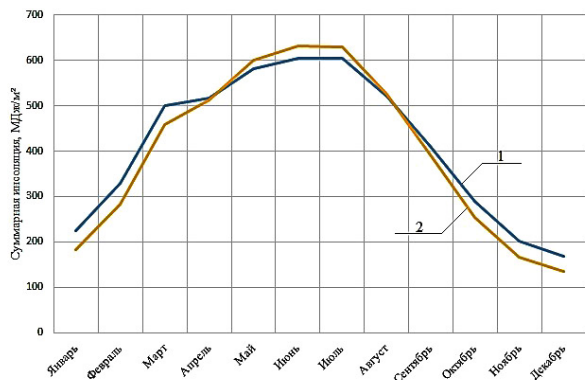


Рис. 5. Графики суммарной инсоляции для теплого периода: 1 — при оптимальном угле, определяемом в соответствии с нормативной документацией; 2 — при оптимальном угле, рассчитываемом программой

Fig. 5. Graphs of total solar irradiation for the warm period: 1 — at the optimal tilt angle determined per regulatory standards; 2 — at the optimal tilt angle calculated by the program

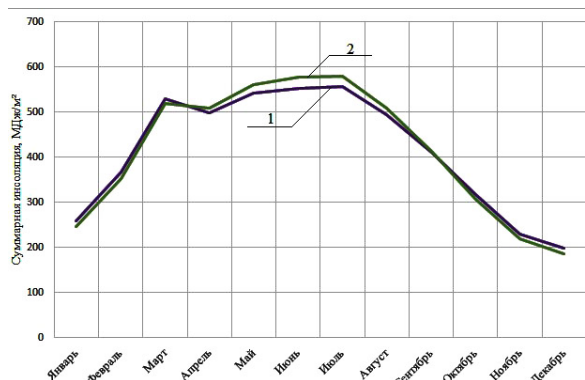


Рис. 6. Графики суммарной инсоляции для нерегулируемых установок: 1 — при оптимальном угле, определяемом в соответствии с нормативной документацией; 2 — при оптимальном угле, рассчитываемом программой

Fig. 6. Graphs of total solar irradiation for fixed-mount installations: 1 — at the optimal tilt angle determined per regulatory standards; 2 — at the optimal tilt angle calculated by the program

Таблица 2. Результаты расчета суммарной инсоляции при оптимальных углах наклона
Table 2. Calculation results of the total solar irradiation by optimal tilt angles

Период	Суммарная инсоляция при оптимальном угле наклона, МДж/м ²					
	Расчет при использовании оптимальных углов, определяемых по нормативной документации			Расчет при использовании оптимальных углов, определяемых программой		
	Для холодного периода	Для теплого периода	Для нерегулируемых установок	Для холодного периода	Для теплого периода	Для нерегулируемых установок
Январь	281,15	224,58	259,90	285,97	182,46	246,02
Февраль	386,25	329,47	366,72	388,90	282,56	352,44
Март	536,85	500,28	529,24	532,51	457,28	519,08
Апрель	460,08	516,00	498,74	433,81	512,19	509,05
Май	482,18	582,26	541,84	446,83	600,16	562,13
Июнь	485,31	603,59	553,17	446,77	631,64	577,66
Июль	492,59	604,54	557,88	454,81	628,31	580,86
Август	448,98	519,82	494,31	420,16	524,45	508,08
Сентябрь	392,58	410,14	411,16	376,48	392,34	413,15
Октябрь	330,35	289,87	317,38	331,08	253,99	307,01
Ноябрь	247,58	200,96	230,34	251,22	165,54	218,85
Декабрь	216,40	169,42	198,46	220,77	135,19	186,99
Год	4760,30	4950,93	4959,14	4589,31	4766,11	4981,31

отличаются в большую сторону в релевантном для их использования периоде, что отчетливо видно на представленных графиках (рис. 7).

Сводные результаты расчета суммарной инсоляции при оптимальных углах наклона в релевантные периоды представлены в табл. 3.

Результаты представленных расчетов показывают, что при использовании вычисляемых программой оптимальных углов, отличных от углов, определяемых в соответствии с нормативной документацией, можно увеличить суммарную инсоляцию на 1,22 %. При применении нерегулируемых установок круглогодичного использования применение оптимального рассчитанного программой угла позволяет увеличить суммарную инсоляцию на 0,44 % в сравнении с оптимальным углом, определяемым по нормативной документации. Столь незначительный рост объясняется тем, что оптимальные углы наклона, вычисленные программой, незначительно отличаются от оптимальных углов для данного

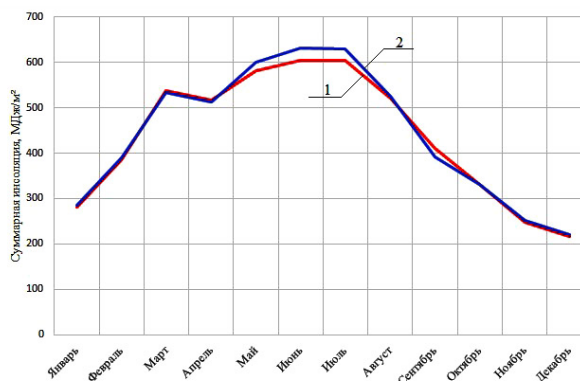


Рис. 7. Графики суммарной инсоляции в релевантные периоды: 1 — при оптимальном угле, определяемом в соответствии с нормативной документацией; 2 — при оптимальном угле, рассчитываемом программой
Fig. 7. Graphs of total solar irradiation for seasonally relevant periods: 1 — at the optimal tilt angle determined per regulatory standards; 2 — at the optimal tilt angle calculated by the program

Таблица 3. Результаты расчета суммарной инсоляции при оптимальных углах наклона в релевантные периоды
Table 3. Calculation results of the total solar irradiation by optimal tilt angles for seasonally relevant periods

Период	Суммарная инсоляция при оптимальном угле наклона, МДж/м ²		Разность суммарной инсоляции при определяемом программой оптимальном угле наклона и нормативном, МДж/м ²	
	При использовании оптимальных углов, определяемых по нормативной документации	При использовании оптимальных углов, определяемых программой	Для релевантных периодов	Для нерегулируемых установок
Год	5234,93	5299,54	64,61	22,17

региона, определяемых по нормативной документации. Прирост суммарной солнечной инсоляции для регулируемых систем при определенных программой оптимальных углах достигает 6 % в сравнении с нерегулируемыми установками, и 6,42 % — в сравнении с нерегулируемыми установками, для которых оптимальный угол наклона равен географической широте региона.

Заключение

Анализ результатов проведенного исследования показывает, что определение оптимального угла наклона тепловоспринимающей поверхности солнечного коллектора может значительно повысить его энергетическую эффективность при проектировании новых систем или настройке существующих.

Как было отмечено ранее, представленные в данной области исследования [13, 18] обладают рядом ограничений. Методология работы [13], использующая схожую математическую модель, реализованную в Matlab, учитывает индекс прозрачности атмосферы и коэффициент альбеда, но ограничена анализом данных за 24 часа и отсутствием функции определения оптимального угла, требуя от пользователя проведения большого количества итеративных расчетов. Напротив, исследование [18] позволяет определять оптимальный угол наклона для длительных периодов, но использует фиксированные значения индекса прозрачности и коэффициентов альбеда, что может значительно снижать точность расчетов.

Разработанная в данной работе математическая модель определения оптимального угла наклона позволяет преодолеть указанные выше ограничения. Она базируется на обобщенной математической модели, которая учитывает: азимутальный угол коллектора, начальный угол наклона коллектора, а также изменяющиеся климатические характеристики, включая индекс прозрачности и коэффициенты альбеда отдельно для теплого и холодного периодов. При этом модель предназначена для определения оптимального угла наклона как для краткосрочных (от 24 часов), так и для долгосрочных (до 365 дней) периодов.

Использование полученных в ходе программного расчета оптимальных углов наклона тепловоспринимающей поверхности позволяет увеличить энергетическую эффективность установки в условиях умеренно континентального климата, например, для г. Омска на 1,22 % в регулируемых системах, и на 0,44 % — в нерегулируемых системах в сравнении с методикой, которая описана в нормативной документации.

Также анализ показал, что при проектировании гелиосистем с целью дальнейшей интеграции в системы потребления тепла крупных жилых

и общественных зданий, предпочтение стоит отдавать регулируемым системам, поскольку прирост солнечной суммарной инсоляции может значительно увеличиваться, что позволяет снизить количество используемых установок и, соответственно, стоимость реализации подобных проектов. Например, для г. Омска применение регулируемых систем, угол наклона которых определен при использовании разработанной математической модели, позволяет осуществить прирост инсоляции до 6,42 % в сравнении с нерегулируемой системой, для которой угол наклона равен географической широте.

Список источников / References

1. Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года: распоряжение от 28 декабря 2024 г. № 4146-р. Доступ из справочно-правовой системы «Гарант Плюс».
2. Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года: распоряжение от 28 декабря 2024 г. № 4146-р [On the approval of the Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast until 2036: Order of 28 December 2024. No. 4146-p]. Available Garant Plus. (In Russ.).
3. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. Введ. 01–01–2013. Москва: Минстрой России, 2015. 124 с.
4. SP 131.13330.2012. Stroitel'naya klimatologiya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIP 23-01-99 [Building climatology. Updated version of the Construction Rules and Regulations 23-01-99]. Moscow, 2015. 124 p. (In Russ.).
5. Научно-прикладной справочник «Климат России». URL: http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/faces/shabdocs/Part_0.xhtml (дата обращения: 12.01.2025).
6. Nauchno-prikladnoy spravochnik "Klimat Rossii" [Scientific and applied reference book "Climate of Russia"]. URL: http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/faces/shabdocs/Part_0.xhtml (accessed: 12.01.2025). (In Russ.).
7. ВСН 52–86. Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования. Введ. 01–07–1987. Москва: Госгражданстрой, 2000. 16 с.
8. VSN 52–86. Ustanovki solnechnogo goryachego vodosnabzheniya. Normy proyektirovaniya [Departmental building code for solar hot water installation. Design Standards]. Moscow, 2000. 16 p. (In Russ.).
9. ГОСТ Р 51595–2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Общие технические условия. Введ. 01–01–2001. Москва: Изд-во стандартов, 2002. 8 с.
10. GOST R 51595–2000. Netraditsionnaya energetika. Solnechnaya energetika. Kollektory solnechnyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Nontraditional power engineering. Solar collectors. General specifications]. Moscow, 2002. 8 p. (In Russ.).

6. Liu B. Y. H., Jordan R. C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE Journal*. 1961. Vol. 3, no. 10. P. 53.
7. Ekadewi A. H., Djatmiko I. P. The optimal tilt angle of a solar collector. *Energy Procedia*. 2013. No. 32. P. 166. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.022.
8. Телегин В. В. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения предприятий ограниченной мощности с использованием альтернативных источников энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Липецк, 2014. 179 с.
- Telegin V. V. Povysheniye effektivnosti funktsionirovaniya sistem elektrosnabzheniya predpriyatiy ogranichennoy moshchnosti s ispol'zovaniyem al'ternativnykh istochnikov energii [Improving the efficiency of functioning enterprises power supply systems of limited power using alternative energy sources]. Lipetsk, 2014. 179 p. (In Russ.).
9. Jamil M. A., Tiwari G. N. Optimization of tilt angle of solar collector to receive maximum radiation. *Open Renewable Energy Journal*. 2009. No. 2. P. 19. DOI: 10.2174/1876387100902010019.
10. Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А. [и др.]. Солнечная энергетика. Москва: Изд-во МЭИ, 2011. 276 с. ISBN 978-5-383-00608-5. EDN: QMLHZD.
- Vissarionov V. I., Deryugina G. V., Kuznetsova V. A. [et al.]. Solnechnaya energetika [Solar energy]. Moscow, 2011. 276 p. ISBN 978-5-383-00608-5. EDN: QMLHZD. (In Russ.).
11. Shyam S. Ch., Rajeev K. A. Estimation of hourly solar radiation on horizontal and inclined surfaces in Western Himalayas. *Smart Grid and Renewable Energy*. 2011. No. 2. P. 45. DOI: 10.4236/sgre.2011.21006.
12. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения / перевод с англ. Г. А. Гухман, С. И. Смирнова. Москва: Энергоиздат, 1982. 80 с.
- Bekman U., Kleyn S., Daffi Dzh. Raschet sistem solnechnogo teplosnabzheniya [Calculation of solar heating systems] / trans. from Engl. by G. A. Gukhman, S. I. Smirnova. Moscow, 1982. 80 p. (In Russ.).
13. Коновалов Ю. В., Хазиев А. Н. Программа расчета солнечной инсоляции в среде MATLAB/SIMULINK // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2021. № 15. С. 66–70. EDN: MVUYUM.
- Kononov Yu. V., Khaziyev A. N. Programma rascheta solnechnoy insolyatsii v srede MATLAB/SIMULINK [Solar insolation calculation program in MATLAB/SIMULINK environment]. Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Bulletin of the Angarsk State Technical University*. 2021. No. 15. P. 66–70. EDN: MVUYUM. (In Russ.).
14. Степанов В. М., Горелов Ю. И., Пахомов С. Н. Анализ способов повышения эффективности функционирования солнечных батарей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 12. С. 17–23. EDN: YTEJUL.
- Stepanov V. M., Gorelov Yu. I., Pakhomov S. N. Analiz sposobov povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya solnechnykh batarey [Analysis of the ways of improving the efficiency of the operation of solar batteries]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. *Tekhnicheskkiye nauki. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2018. Vol. 12. P. 17–23. EDN: YTEJUL. (In Russ.).
15. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR (accessed: 17.01.2025).
16. The NASA surface meteorology and solar energy data set. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accessed: 17.01.2025).
17. Очков В. Ф., Орлов К. А., Чудова Ю. В. [и др.]. Информационные технологии в инженерных расчетах: SMath и Python. Санкт-Петербург, 2023. 212 с. ISBN 978-5-507-45821-9.
- Ochkov V. F., Orlov K. A., Chudova Yu. V. [et al.]. Informatsionnyye tekhnologii v inzhenernykh raschetakh: SMath i Python [Information technologies in engineering computing: SMath and Python]. Saint Petersburg, 2023. 212 p. ISBN 978-5-507-45821-9. (In Russ.).
18. Даус Ю. В. Определение оптимального угла наклона панелей солнечных энергоустановок в условиях Ростовской области // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2016. № 2 (190). С. 67–71. DOI: 10.17213/0321-2653-2016-2-67-71. EDN: WFBSNF.
- Daus Ju. V. Opredeleniye optimal'nogo ugla naklona paneley solnechnykh energoustanovok v usloviyakh Rostovskoy oblasti [Determining optimal tilt angle of solar power installation panels under conditions of the Rostov Region]. Opredeleniye optimal'nogo ugla naklona paneley solnechnykh energoustanovok v usloviyakh Rostovskoy oblasti. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2016. No. 2 (190). P. 67–71. DOI: 10.17213/0321-2653-2016-2-67-71. EDN: WFBSNF. (In Russ.).
19. Метеорологическая база данных OpenWeatherMap. URL: <https://openweathermap.org/> (дата обращения: 19.01.2025).
- Meteorologicheskaya baza dannykh OpenWeatherMap [OpenWeatherMap meteorological database]. URL: <https://openweathermap.org/> (accessed: 19.01.2025). (In Russ.).
20. Метеорологическая база данных Яндекс. URL: <https://yandex.ru/pogoda/b2b/console/home> (дата обращения: 19.01.2025).
- Meteorologicheskaya baza dannykh Yandex [Yandex meteorological database]. URL: <https://yandex.ru/pogoda/b2b/console/home> (accessed: 19.01.2025). (In Russ.).

МИХАЙЛОВ Андрей Гаррьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОМГТУ), г. Омск.
SPIN-код: 7337-8036
AuthorID (РИНЦ): 385534
AuthorID (SCOPUS): 56503044200
АНИСИМОВ Юрий Алексеевич, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» ОМГТУ, г. Омск.
ORCID: 0009-0009-5122-9968
Адрес для переписки: yuriy.alekseevich.00@inbox.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 23.04.2025; одобрена после рецензирования 16.06.2025; принята к публикации 31.07.2025.

MIKHAILOV Andrey Garrievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Heat Power Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 7337-8036
AuthorID (RSCI): 385534
AuthorID (SCOPUS): 56503044200
ANISIMOV Yuriy Alekseyevich, Postgraduate at the Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.
ORCID: 0009-0009-5122-9968
Correspondence address: yuriy.alekseevich.00@inbox.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 23.04.2025; approved after reviewing 16.06.2025; accepted for publication 31.07.2025.