

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА НА ОСНОВЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫБРАННОЙ ЛОКАЦИИ

Произведен сбор климатических ежедневных данных за годовой период для заданной локации, первичный анализ полученных данных и подробная визуализация положения Солнца в течение года, выбор оптимальных технических параметров системы солнечного коллектора на основе климатических данных для выбранной локации (г. Омск). Приведена методика подбора солнечного коллектора.

Ключевые слова: солнечный коллектор, энергосбережение, тепловая энергия, климат, гелиосистема, отопление, горячее водоснабжение.

Введение. Посчитать интенсивность потока солнечного излучения в произвольном месте на поверхности Земли невозможно, но есть данные наблюдений гидрометеослужб во множестве городов нашей планеты, на основании которых можно делать расчёты.

Рассеянное излучение, то есть отражённое от поверхности земли, воды и облаков, не теряется [1]. Солнечный коллектор его так же хорошо воспринимает. Доля рассеянного излучения в суммарном может превышать 50 %, даже в пасмурный день, когда Солнца не видно, коллектор всё равно работоспособен.

Максимальная производительность от солнечного коллектора можно получить, расположив его плоскость перпендикулярно солнечным лучам. Но в течение дня солнце движется по небосклону, и эффективность коллектора изменяется. Меняется положение Солнца и в течение года [2].

Задача расчёта как раз и состоит в том, чтобы определить оптимальные направление и угол наклона коллектора, чтобы получить от него максимальную эффективность в среднем за период использования.

Климатические данные за годовой период. В данной работе данные принимаются для выбранной локации: Западная Сибирь, г. Омск (долгота: 73.37; широта: 54.99).

Исходный код всех упомянутых программ доступен в виде репозитория открытого ресурса «github.io» по адресу: «<https://github.com/tartachyov/SunProject>».

Климатические данные получены через API сервиса «Яндекс.Погода». Источником данных является компания «Яндекс Н.В.» по предварительному согласованию об использовании данных в научных целях и с использованием соответствующего предоставленного ключа доступа. Полученные данные

представляют из себя таблицу расширения из 365 строк с ежедневными климатическими данными для годового периода города Омска, усредненных каждодневно для предыдущих семи лет. Результаты необходимы для расчета продолжительности солнечных суток и сопоставления времен восхода и заката с точным положением и траекторией движения Солнца. Проекция траектории движения и диаграмма положения Солнца для заданной локации (г. Омск) приведена на рис. 1, 2.

Первичный анализ полученных данных и подробная визуализация. Анализируя данные сервиса «Яндекс.Погода» для заданной локации можно построить годовой график распределения дневной температуры (рис. 3) и облачности (рис. 4). На диаграммах видно, что распределение минимальных температур имеет вполне логичный вид и в целом является примером нормального распределения без явных экстремумов и статистические данные пригодны для применения в расчетах далее.

Диаграмма облачности показывает, что в отопительный период облачность выше, чем в летнее время, что, в свою очередь, будет понижать эффективность коллектора в значительной степени [3–4].

График продолжительности светового дня (рис. 5) показывает, что в зимний (отопительный) период солнечный период меньше, нежели в летний, в то время как потребность использования тепловой энергии как раз и необходима в этот период, что явно указывает на то, что при компенсации потребностей будет возникать избыточная теплота в летний период, которую можно использовать для покрытия нужд горячего водоснабжения (ГВС).

Расчет удельных потерь тепла через ограждающие конструкции. Для текущего первичного расчета принимаются удельные потери через некоторую условную ограждающую конструкцию в виде сте-

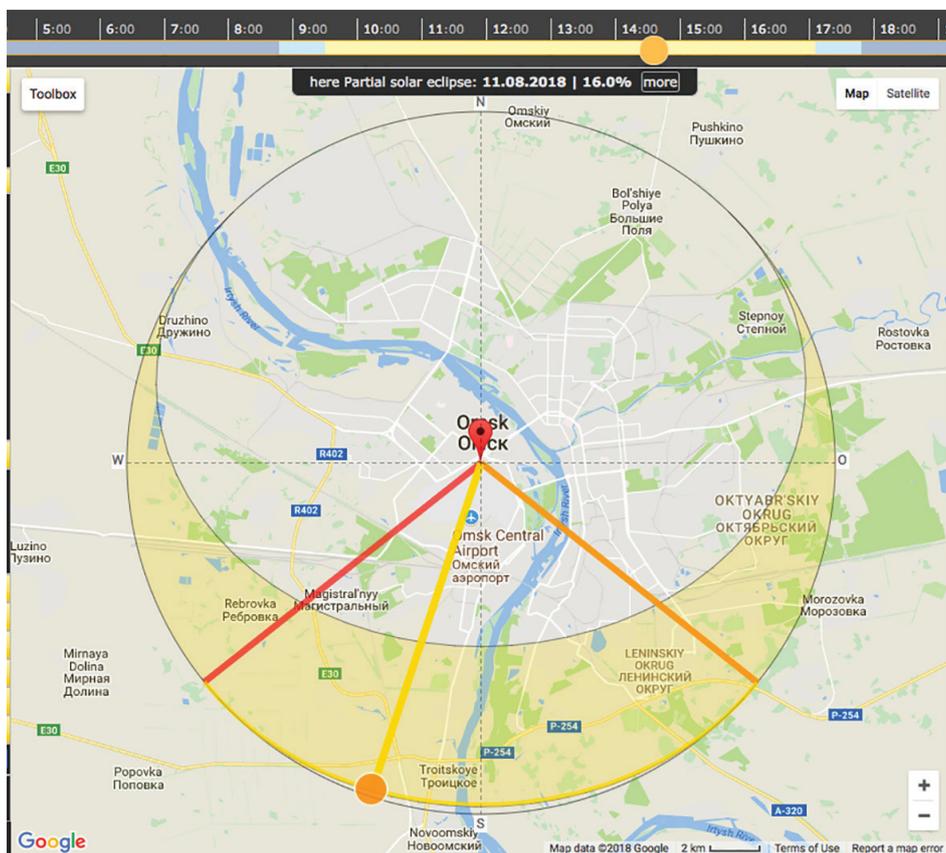


Рис. 1. Проекция траектории движения Солнца от времени

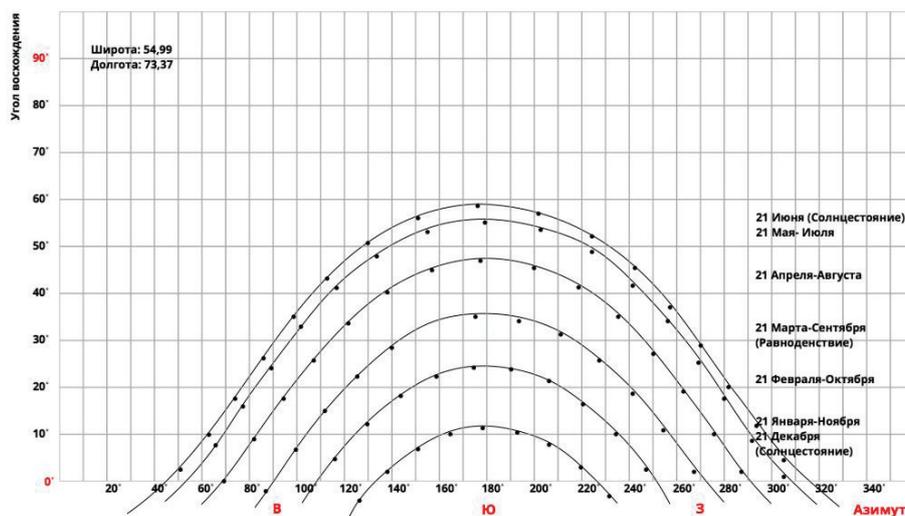


Рис. 2. Диаграмма положения Солнца в течение года для заданной локации

ны, и задаемся следующими параметрами, которые сведены в табл. 1.

Используя заданные параметры [5], определяется коэффициент теплопередачи стены (условной ограждающей конструкции) по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_2}} \quad (1)$$

где α — коэффициент теплоотдачи поверхности стенки воздуху.

Удельные потери на единицу площади, для каждого дня исходя из полученного коэффициента те-

лопередачи, заданной температуры внутреннего воздуха и статистической минимальной температуры окружающей среды из климатических данных определяются по формуле:

$$q = k(t - T_{min}), \quad (2)$$

где T_{min} — минимальная статистическая температура, °C.

Результатом являются значения удельных потерь для каждого дня в диапазоне отопительного периода для заданной локации. По удельным потерям определяются значения потерь (Вт) для принятой площади стены за один час по формуле:



Рис. 3. Годовой график минимальных дневных температур г. Омска



Рис. 4. Годовой график облачности г. Омска

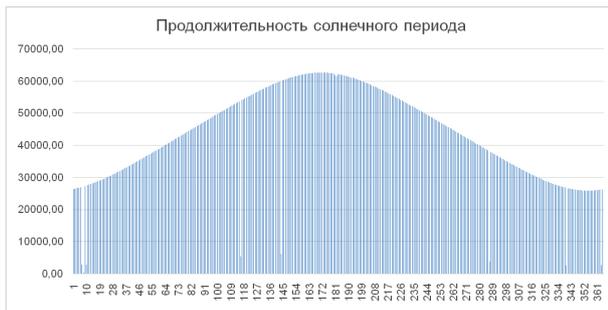


Рис. 5. Годовой график продолжительности светового дня г. Омска

Таблица 1

Параметры для расчета потерь через ограждающую конструкцию

Параметр	Обозначение	Значение
Постоянная температура внутреннего воздуха, °С	t	20
Коэффициент теплопроводности несущего материала (кирпич), Вт/м ² К	λ_1	0,6
Коэффициент теплопроводности теплоизолирующего материала (минеральная вата), Вт/м ² К	λ_2	0,044
Толщина несущей составляющей стенки (кирпич), м	d_1	0,5
Толщина теплоизолирующей составляющей стенки (минеральная вата), м	d_2	0,2
Площадь стены, м ²	S	20

$$Q = q \cdot S. \quad (3)$$

Расчет выполняется при помощи написанной программы «getLosses.go» для вычисления фактических потерь от каждодневной минимальной статистической температуры T_{min} .

В результате имеем значения потерь для г. Омска для отопительного периода (221 день) через условную ограждающую конструкцию для выбранной локации, основанные на статистических климатических данных, которые далее сопоставляются с поступающим количеством тепловой энергии от системы солнечного коллектора заданных параметров также в зависимости от локальных статистических данных для определения размерности оптимальных параметров.

Расчет необходимого тепла на нужды ГВС.

Средний расчетный за сутки отопительного периода объем потребления горячей воды в жилом здании V_{hw} определяют по формуле:

$$V_{hw} = g \cdot m_q \cdot k \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где g — средний за отопительный период расход воды одним пользователем, (105 л/сут для жилых зданий с централизованным ГВС и оборудованных устройствами стабилизации давления воды на минимальном уровне (регуляторы давления на вводе в здание, зонирование системы по высоте, установка квартирных регуляторов давления); m_q — число пользователей, чел.; k — коэффициент, принимаемый 0,6 в случае для многоквартирного дома с учетом оснащённости квартир счетчиками воды.

При расчете на условное количество потребителей, равное одному человеку, объем потребления горячей воды в жилом здании составит $V_{hw} = 0,063$ м³/сут.

Среднедневной за отопительный период расход тепловой энергии на ГВС Q_{hw} , кВт, определяют согласно [6]. Допускается определение среднечасового расхода Q_{hw} по формуле:

$$Q_{hw} = \frac{V_{hw}(55 - t_{wc}) \cdot (1 + k_{hl}) \rho_w C_w}{3,6}, \quad (5)$$

где V_{hw} — средний расчетный за сутки отопительного периода объем потребления горячей воды в жилом здании, м³/сут.; t_{wc} — температура холодной воды, °С; k_{hl} — коэффициент, учитывающий потери теплоты трубопроводами систем ГВС; ρ_w — плотность воды, кг/л; C_w — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг°С).

Таким образом, ежедневная потребность количества теплоты на нужды ГВС для заданных параметров составит $Q_{hw} = 4,96$ кВт.

Расчет полученного тепла посредством статической системы солнечного коллектора. Расчет выполняется для наиболее распространенной принятой площади активной поверхности солнечного коллектора, равной 2,5 м² любого типа конструкции коллектора без учета КПД установки и дополнительных конструктивных потерь для каждого часа каждого дня по имеющимся статистическим данным и производится суммирование для каждого дня за солнечный период, уникальный для каждого дня, исходя из имеющихся данных восходов и закатов [7].

Теплота, полученная за один час, находится по формуле:

$$Q = 0,8G_{bt} \left(1 - \frac{CI}{100} \right), \quad (6)$$

где CI — статистическая величина облачности в процентах; G_{bt} — спроецированная величина радиационной энергии на плоскость в зависимости от ее абсолютного положения.

$$G_{bt} = G_{bn} \cos \Theta, \quad (7)$$

где G_{bn} — прямая величина радиационной энергии при текущих условиях положения солнца; Θ — угол светового потока по отношению к орт-вектору плоскости.

$$G_{bn} = G_{sc} e^{\left(\frac{T_L}{0,9+9,4 \cos \Theta_z} \right)}, \quad (8)$$

где G_{sc} — солнечная постоянная, равная 1368 Вт/м^2 ; T_L — коэффициент мутности атмосферы, принятый по статистическим данным и усредненный помесечно; Θ_z — угол падения светового потока по отношению к плоскости земли в локальной точке в крайнем верхнем положении солнца для данного дня.

$$\cos \Theta_z = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta, \quad (9)$$

где ϕ — постоянная широта для заданной локации в градусах (г. Омск — $54,99$); δ — угол наклона оси земного шара в солнечной системе; ω — часовой угол.

$$\theta = \theta_z - (\beta - \beta' + \gamma - \gamma'), \quad (10)$$

где β, γ — угол восхождения и азимут Солнца, зависящий от времени и принимаемый по статистическим данным; β', γ' — орт-вектор и азимут статической плоскости солнечного коллектора.

$$\delta \approx 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right), \quad (11)$$

где n — номер расчетного дня в году.

$$\omega = \text{Arc} \sin \left(\frac{\sin \gamma \cos \beta}{\cos \delta} \right). \quad (12)$$

Расчет выполняется написанной программой «SolarIncome.go» многократно с целью нахождения наиболее эффективного положения с максимальным суммарным годовым получением теплоты по параметрам β' и γ' в диапазонах (0:90) и (50:306) градусов соответственно, исходя из экстремумов азимута и угла восхождения заданной локации [8].

В результате находим каждодневные данные получаемой теплоты посредством статической системы с максимальным годовым получением теплоты и наилучшие параметры азимута и угла наклона поверхности коллектора для г. Омска, равные $\beta' = 183$ и $\gamma' = 23$ с суммарным годовым удельным количеством теплоты 244 кВт/м^2 и годовое количество получаемой тепловой энергии 610 кВт для заданной активной площади коллектора.

Расчет полученного тепла посредством динамической системы. Выполняется аналогичным образом, но без угла поправки на абсолютное положение солнечного коллектора в пространстве и тем самым позволяет достичь получения большего количества теплоты в сравнении с статической



Рис. 6. Сравнительный график динамической и статической систем

системой. Временной картой положения поверхности коллектора в пространстве будет являться диаграмма перемещения солнца в течение года с ее значениями азимута и угла восхождения, как постоянным перпендикуляром к поверхности коллектора [9].

Результат годового количества теплоты составляет 658 кВт , что на 48 кВт , или $7,8 \%$ эффективнее в сравнении с наиболее оптимально расположенной статической системой.

Комплексное сравнение динамической и статической систем. Динамическая система на столь длительном промежутке показывает преимущество всего в $7,8 \%$, что, на первый взгляд, говорит о том, что применение динамической системы имеет смысл. Но полученный результат не учитывает постоянных затрат электроэнергии на привод электродвигателя для вращения системы солнечного коллектора, что снижает преимущество данной системы над статической или даже уравнивает в зависимости от общего веса системы и активной площади поверхности коллектора.

График отношения динамической и статической систем (рис. 6) представляется как функциональная зависимость в виде синусоиды с известной амплитудой.

Стоит отметить, что среднее годовое значение дневной выработки энергии у динамической и статической систем при различной суммарной годовой выработке практически не отличаются ($1,6 \text{ кВт/день}$), это обусловлено тем, что для статической системы наблюдается больший диапазон значений в сравнении с динамической, в которой положение системы всегда стремится быть неизменным по отношению к световому потоку.

Посезонное регулирование положения системы (азимута, наклона) и его преимущества. Производится расчет посезонного регулирования системы с нахождением оптимальных положений для зимнего (отопительного) и летнего сезонов для улучшения суммарного годового получения энергии у статической системы при помощи разделения исходных климатических данных на сезоны в программе «SolarIncome.go».

Получаем результат с максимальным получением теплоты в течение сезонов и наилучшие параметры азимута и угла наклона поверхности коллектора, отличные от ранее найденного наилучшего годового положения и равные $\gamma' = 180$ и $\beta' = 37$ и $\gamma' = 184$ и $\beta' = 5$ для зимнего и летнего периодов соответственно с суммарным годовым удельным количеством теплоты 254 кВт/м^2 и суммарное годовое

```

→ Sun go run main.go
FINAL annual: azimuth: 183
beta: 23
sumQ: 244101.14718677913
FINAL winter: azimuth: 180
beta: 37
sumQ: 140661.63247123305
FINAL summer: azimuth: 184
beta: 5
sumQ: 114621.1043044286

```

Рис. 7. Результат выполнения программы

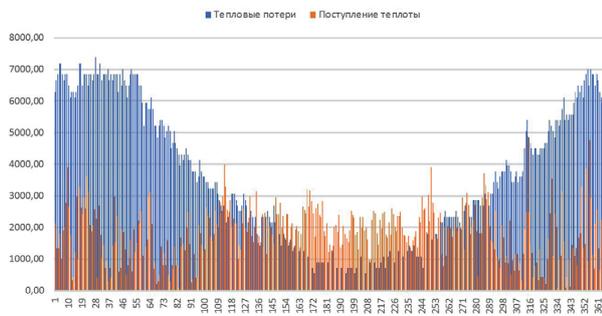


Рис. 8. Сравнительный график тепловых потерь через ограждающую конструкцию и полученной тепловой энергии от Солнца

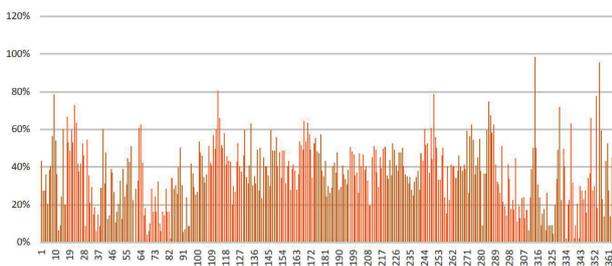


Рис. 9. Покрытие теплопотребления на нужды ГВС

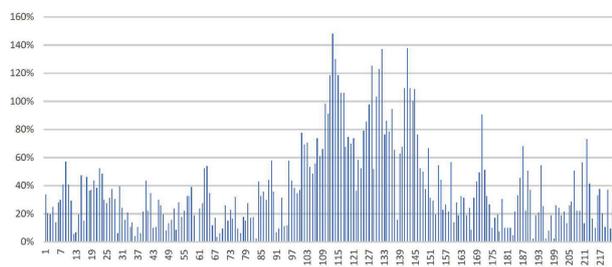


Рис. 10. Доля компенсации тепловых потерь

количество получаемой тепловой энергии 632 кВт для заданной активной площади коллектора, что на 22 кВт или 3,6 % больше от ранее найденного наилучшего годового положения без посезонного регулирования. Таким образом, регулирование положения дважды за год значительно снижает преимущество динамической системы над статической.

При этом среднее значение дневной выработки энергии для сезонов становится равным 1,58 кВт и 1,98 кВт для зимнего и летнего режимов, соответственно, а суммарное же годовое, в свою очередь, становится 1,74 кВт, что на 4,8 % больше, чем среднее годовое значение дневной выработки энергии без посезонного регулирования [10].

Анализ полученных расчетных данных, выделение оптимизируемых параметров и нахождение их экстремумов. Фактическим результатом программы расчета является сводная таблица «globalExport.csv» в директории «./data/CSVs» (экспортированный файл для г. Омска доступен в репозитории, адрес которого был предоставлен вначале) из 365 строк со значениями для каждого дня тепловых потерь через ограждающие конструкции, результаты поступления тепловой энергии от динамической системы, статических систем с наилучшим годовым и сезонными положениями, а также значения процентов компенсации потерь при использовании систем различных типов с наилучшими положениями и, помимо этого, затраты на нужды ГВС и их возможное процентное покрытие.

Также результат программы отображает в консоли найденные наилучшие положения (азимут и угол восхождения) и удельную выработку теплоты за период, приведенные на рис. 7.

На приведенном графике (рис. 8) можно видеть, что значительная доля полученной тепловой энергии приходится на летний период, в который полностью отсутствует потребность в отоплении, поэтому имеет смысл применение системы солнечного коллектора для покрытия нужд тепловой энергии на ГВС в этот период, что показано на рис. 9.

Доля компенсации теплопотерь (рис. 10) в среднем составляет 39 % потребности на отопление, при этом на всем промежутке сильно варьируется, но и в некоторых точках (днях) превышает даже необходимую, то есть 100 % потерь. Максимальное значение составляет 147 %, а минимальное 2 %, что обусловлено высокой степенью облачности [11 – 13].

Закключение. Итоговая автоматизированная программа расчета солнечного коллектора доступна к использованию в репозитории по адресу: <https://github.com/tartachyov/SunProject> и позволяет на основе фактических статистических климатических данных реализовать расчет (подбор):

- фактических теплопотерь через ограждающие конструкции в зависимости от климатических ежедневных показателей для заданной локации;
- необходимой площади системы коллектора (-ов) для круглогодичного ежедневного частичного фиксированного процентного или полного покрытия нужд ГВС по заданным параметрам потребления для заданной локации;
- необходимой площади для полного покрытия нужд ГВС и частичного покрытия отопления по заданным параметрам теплопотерь для заданной локации;
- процента возможного покрытия нужд ГВС для заданной суммарной активной площади коллектора (-ов);
- процента возможного покрытия отопления при полном покрытии нужд ГВС для заданной суммарной активной площади коллектора (-ов);
- наиболее эффективного круглогодичного положения активных плоскостей коллектора (-ов) в пространстве (азимут и угол восхождения);
- наиболее эффективного положения для посезонного регулирования;

— сравнительных показателей прироста эффективности по теплопоступлению для технико-экономического расчета систем со статическим положением, сезонным регулированием, динамическим положением для заданной локации.

А также возможно смоделировать систему с произвольно заданным положением активной поверхности коллектора и наиболее точно рассчитать поступление теплоты для необходимого периода для заданной локации.

Библиографический список

1. Günther M. Ch. 2. Solar Radiation // Advanced CSP Teaching Materials. Institute for Electrical Engineering, University of Kassel, 2008. 88 p. URL: <http://www.energy-science.org/bibliotheque/cours/1361470275Chapter%2002%20radiation.pdf> (дата обращения: 15.01.2018).
2. Cooper P. I. The absorption of radiation in solar stills // Solar Energy. 1969. Vol. 12, no. 3. P. 333–346. DOI: 10.1016/0038-092X(69)90047-4.
3. Origill J. F., Hollands K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface // Solar Energy. 1977. Vol. 19, Issue 4. P. 357–359. DOI: 10.1016/0038-092X(77)90006-8.
4. Федоров В. Н. Солнечная радиация и климат Земли. М.: Физматлит, 2017. 324 с. ISBN 978-5-9221-1785-2.
5. Маклакова Т. Г., Нанасова С. М. Конструкции гражданских зданий. М.: АСВ, 2002. 272 с.
6. СНиП 2.04.01–85. Внутренний водопровод и канализация зданий / Минстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1996. 60 с.
7. Расторгуев И. П., Неижмак А. Н. Методика оценки климатического потенциала солнечной и ветровой энергетики // Гелиогеофизические исследования. 2014. Вып. 9. С. 150–160.
8. Сервис Яндекс.Погода. URL: <https://yandex.ru/pogoda/omsk> (дата обращения: 15.01.2018).
9. Дмитриева-Арраго Л. Р., Трубина М. А., Толстых М. А. Роль фазового состава облаков в формировании потоков ко-

ротковолновой и длинноволновой радиации // Труды Гидрометцентра России. 2017. № 363. С. 19–34.

10. Германович В., Турилин А. Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы. М.: Наука и Техника, 2011. 320 с. ISBN 978-5-94387-838-1.

11. Дроздов О. И., Васильев В. А. [и др.]. Климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 568 с.

12. Cano D., Monget J. M., Albuisson M. [et al.]. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data // Solar Energy. Vol. 37, Issue. 1. P. 31–39. DOI: 10.1016/0038-092X(86)90104-0.

13. Quaschnig V. Unstete Plangröße. Wo Sie Daten für die Sonneneinstrahlung finden // Sonnenenergie. 2001. Vol. 6. S. 24–27.

ФИНИЧЕНКО Александра Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика». SPIN-код: 6318-3905

AuthorID (РИНЦ): 662766

Адрес для переписки: Finicenkoalex@gmail.com

ТАРТАЧЕВ Александр Андреевич, студент гр. 34-ж теплоэнергетического факультета.

Адрес для переписки: Tartachevsasha@gmail.com

Для цитирования

Финиченко А. Ю., Тартачев А. А. Подбор оптимальных параметров системы солнечного коллектора на основе климатических данных для выбранной локации // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 88–93. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-88-93.

Статья поступила в редакцию 09.05.2018 г.

© А. Ю. Финиченко, А. А. Тартачев