

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДА

Е.С. Аронова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

В.А. Мургул

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Использование солнечной энергии для дополнительного энергоснабжения зданий и улучшения качества городской среды является одним из направлений повышения энергетической эффективности жилой исторической застройки Санкт-Петербурга.

В статье представлена методика и выполнены расчеты поступления солнечного излучения на различно ориентированные наклонные поверхности в метеоусловиях Санкт-Петербурга. Определена выработка электроэнергии солнечными фотоэлектрическими модулями (ФЭМ) в реальных условиях функционирования. Разработан алгоритм оценки влияния частичного затенения поверхности фотоэлектрических модулей на вырабатываемую электроэнергию. Показано, что оптимальный угол наклона поверхности ФЭМ, обеспечивающий максимальную выработку электроэнергии и минимальные потери вследствие затенения при эксплуатации в условиях г. Санкт-Петербург, составляет 30-40°.

Ключевые слова: солнечная энергия, энергоэффективность, историческая застройка, реконструкция

THE EVALUATION OF THE APPROPRIATENESS FOR USING SOLAR ENERGY TECHNOLOGIES IN THE HISTORICAL BUILDING OF ST. PETERSBURG AND THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE NORTH-WEST REGION

E.S. Aronova

Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences Russia, Saint-Petersburg, Russia

V. Murgul

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), Saint-Petersburg, Russia

Abstract

In the article the methodology and calculations of the amount of the solar irradiance on differently orientated inclined surfaces in weather conditions of Saint-Petersburg were presented. Power generation by solar photovoltaic modules (PV) in real operation condition was determined. Algorithm for calculation of the influence of partial shadowing of photovoltaic module surface on the power generation was developed. It's shown that optimal inclination

angle of PV surfaces, which provides maximum power generation and minimal power losses, due to shading in condition of c. Saint-Petersburg, is 30-40°.

Keywords: architecture, solar energy, energy-efficient buildings, energy-efficient technologies

Введение

Использование солнечной энергии для дополнительного энергоснабжения зданий и улучшения качества городской среды является одним из направлений повышения энергетической эффективности жилой исторической застройки Санкт-Петербурга.

Рассматривая процесс повышения энергетической эффективности как сумму двух составляющих: энергосбережения и использования возобновляемых источников энергии, остановимся подробно на последнем, в частности, на использовании солнечной энергии.

Учет специфики охранных практик Санкт-Петербурга и климатических особенностей Северо-Западного региона является основополагающим фактором при рассмотрении вопроса о возможности энергоснабжения зданий на основе солнечной энергии.

Реконструкция городского пространства исторического центра Санкт-Петербурга в значительной степени ограничена и подчинена интересам охраны, в частности регламентом, изложенным в Законе Санкт-Петербурга «О границах зон охраны объектов культурного наследия и режимах использования земель в границах указанных зон» [1].

Сочетание пообъектной, средовой и градостроительной охранных практик является спецификой для Санкт-Петербурга. Градостроительные принципы, объемно-пространственный планировочный каркас, общегородской силуэт, ансамбли площадей и перспективы улиц исторического центра являются предметами охраны наряду с отдельными объектами культурного наследия [2].

Будучи развивающимся мегаполисом, Санкт-Петербург испытывает постоянные реконструктивные преобразования. Нарастающий объем материального износа определяет нарастающие объемы реконструкции жилого фонда, в том числе, и исторической застройки. Уплотнительная застройка городского центра, как правило, выливается в увеличение мансардного строительства.

Постоянное ужесточение норм энергетического потребления зданиями на фоне заинтересованности общества в глобальной стабилизации экологической ситуации на планете, привело к пересмотру принципов производства и потребления энергетических ресурсов. До 40% энергетического потребления приходится на жилищно-коммунальный сектор. Опыт энергетической модернизации зданий массовых серий дает ряд положительных примеров.

Повышение энергетической эффективности зданий в первую очередь связано с энергосбережением. Именно мероприятия по энергосбережению обладают максимальным экономическим эффектом. Мероприятия по энергосбережению являются обязательными и основными, определяющими общую экономическую эффективность комплекса энергоэффективных мер. Однако сокращение энергопотребления за счет раскрытия имеющегося потенциала энергосбережения является лишь частью процесса гармонизации здания и окружающей среды.

Многочисленные положительные примеры энергетической модернизации зданий первых массовых серий могут стать основой типовых проектных решений. Однако совершенно другой областью является реконструкция зданий исторического наследия. С одной

стороны - невозможность «консервации» городской среды (Санкт-Петербург остается динамично развивающимся мегаполисом), с другой стороны - абсолютная невозможность потери культурного наследия, представляющего основу национального сознания и идентификации Санкт-Петербурга как объекта Всемирного наследия.

Возобновляемая или регенеративная энергия

Энергия источников, которые по масштабам человечества являются неисчерпаемыми. Основной принцип использования возобновляемой энергии заключается в её извлечении из постоянно происходящих в окружающей среде процессов и предоставлении для технического применения [3]. К основным возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) относятся: энергия Солнца, ветровая энергия, энергия биомассы, геотермальная энергия и гидроэнергия.

Энергия солнца

Солнечная энергия может использоваться **как локально** (фотоэлектрические преобразователи, интегрированные в ограждающие конструкции здания, термодинамические системы, являющиеся частью здания или представляющие собой отдельное оборудование), **так и для централизованного энергоснабжения** («солнечные станции»). Солнце, различно нагревая землю и воду на нашей планете, приводит в движение механизмы атмосферной циркуляции, создавая ветер, океанические течения, ветровые волны [3]. Говоря о солнечном энергоснабжении зданий, можно с уверенностью назвать использование солнечной энергии формообразующим фактором в архитектуре.

Солнечные фотоэлектрические технологии являются одними из наиболее перспективных технологий использования возобновляемых источников энергии. Производство электроэнергии непосредственно из солнечного излучения осуществляется без ущерба для окружающей среды (в отличие от биомассы) и истощения ресурсов.

Прогресс в области развития фотоэлектрических преобразователей ведет к неуклонному повышению КПД и снижению стоимости. Отечественная отрасль возобновляемой энергетики демонстрирует сегодня значимые результаты. **Основные причины**, побудившие мировое сообщество к пересмотру взглядов на традиционное энергоснабжение зданий, следующие: **во-первых**, это глобальные климатические изменения, видимые признаки которых с каждым годом становятся все явственнее.

При сжигании традиционных видов энергоресурсов в атмосферу выбрасывается значительное количество CO₂, присутствие которого определяет глобальные климатические изменения. **Другая причина** – гипотеза о скорой исчерпаемости невозобновляемых природных ресурсов. Неизменным преимуществом систем на основе **ВИЭ** является возможность децентрализованного, локального энергообеспечения, что всегда являлось стимулом к их развитию. Сегодня мы наблюдаем основную тенденцию в мире – к ужесточению норм на энергопотребление и, соответственно, постоянный пересмотр стандартов энергоэффективности.

Данное исследование направлено на решение двух основных задач:

- во-первых, это **вопросы архитектурной адаптации**, гармоничного включения технологий солнечной энергетики в историческую среду Санкт-Петербурга;
- во-вторых, это **обеспечение эффективной работы** систем солнечного энергообеспечения в условиях сверхплотной городской застройки Петербурга и климатических условиях Северо-Запада.

Использование солнечной энергии для энергоснабжения реконструируемой исторической застройки Санкт-Петербурга с учетом действующего охранного регламента и с учетом климатических особенностей Северо-Западного региона – остается мало исследованной областью.

Детальный анализ действующих режимов зон охраны показал значительные ограничения на размещение фотоэлектрических преобразователей на ограждающих конструкциях жилых зданий исторического центра Санкт-Петербурга [4]. В большинстве случаев, «открытое» технологическое дооснащение возможно лишь на дворовых фасадах и кровельных скатах. Как правило, допускается локальное изменение архитектурного решения лицевых фасадов исторических зданий, строений и сооружений лишь на уровне первых и цокольных этажей, и не допускается полное изменение архитектурного решения лицевых фасадов, в частности, размещение на них инженерно-технического оборудования. В большинстве случаев допускается перекрытие замкнутых дворовых пространств и изменение архитектурного решения дворовых фасадов в соответствии с заключением государственного органа охраны объектов культурного наследия.

Оптимизация угла наклона фотоэлектрических панелей и ориентации по сторонам света – важная составляющая для эффективной выработки солнечной энергии [5]. Однако, «скрытая» интеграция систем солнечного энергообеспечения не дает такой возможности. Выбор «эффективных» для выработки энергии поверхностей ограждающих конструкций зданий ограничен.

Выходом из сложившейся ситуации может стать решение - выделить системы дополнительного энергетического обеспечения на основе солнечной энергии в класс временных конструкций, потенциально отделимых от капитального остова здания [6].

Подобное предложение интересно для практики реконструкции Петербурга, в связи с наличием жестких регламентов охраны, и в связи с климатическими особенностями Северо-Запада.

Также перспективным может быть использование «интегрированных» материалов Building-integrated photovoltaic (BIPV), их «незаметное» включение в ограждающие конструкции лицевых фасадов, и «открытое» включение в дворовые фасады. Building-integrated photovoltaic (BIPV) - интегрируемые фотоэлектрические элементы. Являются фотоэлектрическими материалами, которые используются для замены обычных строительных материалов в части ограждающих конструкций, таких как крыша, окна, или фасад. Они все чаще используются при строительстве новых зданий, как основной или дополнительный источник электроэнергии. Преимущество материалов класса BIPV над обычными, неинтегрированными, системами является то, что они способны полностью замещать традиционные ограждающие и отделочные материалы.

В качестве последней разработки в этом направлении стоит отметить «интегрированные фотоэлектрические и тепловые системы (BIPVT)». Энергетическая эффективность фотоэлектрических модулей на основе кристаллического кремния в значительной степени зависит от нагрева. «Интегрированные фотоэлектрические и тепловые системы» (BIPVT) явились технологией, которая объединила фотоэлектрические и тепловые системы, одновременно обеспечивая выработку как электрической, так и тепловой энергии.

Какова реальная выработка солнечной энергии в климатических условиях Северо-Запада?

Решение вопроса о целесообразности применения солнечных технологий возможно лишь при наличии данных об энергетической эффективности (выработке электроэнергии) солнечных фотоэлектрических модулей (ФЭМ), и систем электроснабжения (СЭС) на их основе. Количество электроэнергии, вырабатываемой ФЭМ, напрямую зависит от

поступления солнечного излучения в рассматриваемых климатических условиях эксплуатации и определяется формулой:

$$W_{эл}^{\PhiЭМ} = \int_{t_1}^{t_2} E_i^{СИ} \cdot \eta^{\PhiЭМ} \cdot S^{\PhiЭМ} \cdot dt \quad ((1))$$

где $E_i^{СИ}$ – плотность потока солнечного излучения, падающего на лучевоспринимающую поверхность модулей, с учетом их ориентации в пространстве в момент времени i ; $\eta^{\PhiЭМ}$ – КПД солнечного модуля, зависящий от технологии изготовления, сообщается производителем; $S^{\PhiЭМ}$ – площадь фотоэлектрического модуля в соответствии с его спецификацией; t_1 и t_2 – определяют период времени при расчетах вырабатываемой электроэнергии.

Таким образом, для определения эффективности и целесообразности применения ФЭМ и СЭС на их основе, в первую очередь необходимо определить поступление солнечного излучения на ориентированную лучевоспринимающую поверхность модулей в реальных климатических условиях эксплуатации.

Исследование закономерностей, количественно определяющих изменение потока излучения при прохождении его через материальную среду, началось задолго до того, как была выяснена природа физических процессов, вызывающих это изменение. Общий закон ослабления света, при его прохождении через поглощающую и рассеивающую среду, был установлен экспериментально еще в 1729 году французским физиком П. Бугером.

С тех пор исследования в данной области продолжались российскими и зарубежными учеными. Так К. Кондратьев в монографии [7] систематически изложил основные вопросы, касающиеся расчета коротковолновой солнечной радиации, и её преобразования в атмосфере. С. Сивков [8] уточнил расчетные зависимости, позволяющие восполнить недостаток фактических наблюдаемых данных по приходу прямого и полного солнечного излучения (СИ), связал различные характеристики радиационного режима друг с другом и с воздействующими на них метеорологическими факторами.

Для определения поступления солнечного излучения в реальных условиях облачности на территории Российской Федерации были проанализированы существующие методы расчета, и на их основе разработана расчетная методика, демонстрирующая хорошие совпадения расчетных и наблюдаемых данных (расхождения не превышают 8 %). Повышение точности расчета достигается введением поправочных коэффициентов для прямого, $K_{гор}^{пр}$, и диффузного излучения, $K_{гор}^{диф}$, полученных на основе оценок расчетных и наблюдаемых данных 50 станций, расположенных на территории Российской Федерации. Основные зависимости для расчета поступления СИ при чистом небе имеют вид [9]:

– для прямого солнечного излучения:

$$E_{гор}^{пр} = E_{C_{\perp}} \cdot \cos \Theta_{Zi} \cdot \tau_{Ri} \cdot \tau_{O_3i} \cdot \tau_{газi} \cdot \tau_{H_2O_i} \cdot \tau_{Ai} \cdot K_{гор}^{пр}, \quad (2)$$

где τ_R и τ_A – коэффициенты пропускания, учитывающие релеевское и аэрозольное рассеяние; τ_{O_3} , $\tau_{газ}$, τ_{H_2O} – коэффициенты пропускания, учитывающие поглощение солнечного излучения озоном, газовой смесью (O_2 , N_2 , CO_2), парами воды;

– для диффузного солнечного излучения:

$$E_{\text{гор}_i}^{\text{диф}} = E_C \cdot \cos \Theta_{Z_i} \cdot \tau_{O_3_i} \cdot \tau_{\text{газ}_i} \cdot \tau_{H_2O_i} \cdot \tau_{AA_i} \cdot (0,5 \cdot (1 - \tau_{R_i}) + B_a \cdot (1 - \tau_{AS_i})) / (1 - M_i + M_i^{1.02}) \cdot K_{\text{гор}}^{\text{диф}}, \quad (3)$$

где τ_{AA} – коэффициент пропускания, учитывающий аэрозольное рассеяние; τ_{AS} – коэффициент поглощения, учитывающий рассеяние частицами сухого воздуха; B_a – отношение рассеянного прямого излучения к общему рассеянному излучению; M – атмосферная масса:

– для полного солнечного излучения:

$$E_{\text{гор}_i}^{\text{полн}} = (E_{\text{гор}_i}^{\text{пр}} + E_{\text{гор}_i}^{\text{диф}}) / (1 - r_3 \cdot r_a), \quad (4)$$

где r_3, r_a – альbedo земной поверхности и атмосферы.

Переход к реальным условиям облачности при расчете часовых значений плотности солнечного излучения осуществляется в предположении, что среднедневной профиль поступления излучения при чистом небе аппроксимирует среднедневной профиль его поступления в реальных условиях:

$$E_{\text{гор}_i}^{\text{пр}_p} = E_{\text{гор}_i}^{\text{пр}} \cdot \frac{W_{\text{гор}_j}^{\text{пр}_n}}{W_{\text{гор}_j}^{\text{пр}}}; \quad E_{\text{гор}_i}^{\text{диф}_p} = E_{\text{гор}_i}^{\text{диф}} \cdot \frac{W_{\text{гор}_j}^{\text{диф}_n}}{W_{\text{гор}_j}^{\text{диф}}}, \quad (5)$$

где $E_{\text{гор}_i}^{\text{пр}}$, $E_{\text{гор}_i}^{\text{диф}}$ и $E_{\text{гор}_i}^{\text{пр}_p}$, $E_{\text{гор}_i}^{\text{диф}_p}$ – часовые значения плотности прямого, диффузного солнечного излучения при чистом небе и в реальных условиях;

$W_{\text{гор}_j}^{\text{пр}_n}$, $W_{\text{гор}_j}^{\text{пр}}$ и $W_{\text{гор}_j}^{\text{диф}_n}$, $W_{\text{гор}_j}^{\text{диф}}$ – наблюдаемые и расчетные среднemesячные дневные суммы прямого и диффузного излучения, падающего на горизонтальную поверхность; i и j – номера расчетного часа и дня года.

Расчетные данные для горизонтальных поверхностей используются при оценке поступления СИ на лучевоспринимающие поверхности солнечных фотоэлектрических модулей с учетом их ориентации в пространстве по следующим формулам:

– для прямого солнечного излучения:

$$E_{\text{ор}_i}^{\text{пр}_p} = E_{\text{гор}_i}^{\text{пр}} \cdot \cos \Theta_i / \cos \Theta_{Z_i} \quad (6)$$

где $\cos \Theta_i$ – косинус угла падения лучей на ориентированную поверхность.

Значения косинуса угла падения солнечных лучей на наклонную поверхность определяются:

$$\begin{aligned}
\cos \Theta_i = & \sin \delta_n \cdot \sin \varphi_M \cdot \cos \beta_i - \sin \delta_n \cdot \cos \varphi_M \cdot \sin \beta_i \cdot \cos \gamma_i \\
& + \cos \delta_n \cdot \cos \varphi_M \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \omega_{C_i} + \\
& + \cos \delta_n \cdot \sin \varphi_M \cdot \sin \beta_i \cdot \cos \gamma_i \cdot \cos \omega_{C_i} \\
& + \cos \delta_n \cdot \sin \beta_i \cdot \sin \gamma_i \cdot \sin \omega_{C_i}
\end{aligned} \tag{7}$$

где δ_n и ω_{C_i} – угол склонения и часовой угол Солнца; β – угол наклона поверхности к горизонту; γ_i – угол азимута Солнца:

– для диффузного солнечного излучения:

$$E_{\text{ор}_i}^{\text{диф}_p} = E_{\text{гор}_i}^{\text{диф}_q} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta_i}{2} \right) \tag{8}$$

В случаях, когда угол наклона ФЭМ к горизонту отличается от 0° , на лучевоспринимающую поверхность модуля поступает также отраженная от земли часть потока полного солнечного излучения. Поступление отраженного полного солнечного излучения в реальных условиях облачности на наклонную поверхность зависит главным образом от двух факторов – коэффициента отражения или альбедо земной поверхности и угла наклона самой поверхности установки β и определяется по формуле:

$$E_{\text{ор}_i}^{\text{отр}_p} = E_{\text{гор}_i}^{\text{полн}_p} \cdot r_z \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta_i}{2} \right) \tag{9}$$

где $E_{\text{гор}_i}^{\text{полн}_p}$ – плотность потока полного солнечного излучения на горизонтальную поверхность.

Плотность потока полного солнечного излучения, падающего на ориентированную поверхность фотоэлектрической установки в реальных условиях облачности, определяется путем суммирования найденных значений плотностей прямого, диффузного и отраженного излучения по формуле:

$$E_{\text{ор}_i}^{\text{полн}_p} = E_{\text{ор}_i}^{\text{пр}_p} + E_{\text{ор}_i}^{\text{диф}_p} + E_{\text{ор}_i}^{\text{отр}_p} \tag{10}$$

Таким образом, выше представлены формулы и алгоритм расчета поступления потока солнечного излучения на произвольно ориентированную в пространстве поверхность ФЭМ в реальных климатических условиях эксплуатации. Данная методика была заложена в основу компьютерной программы, которая позволяет автоматизировать и максимально сократить время расчетов.

Основное диалоговое окно программы представлено на Рис. 1. В нем пользователь вводит широту, номер дня года, а также в раскрывающемся диалоговом списке выбирает файл с наблюдаемыми данными для рассматриваемого географического пункта Рис. 2.

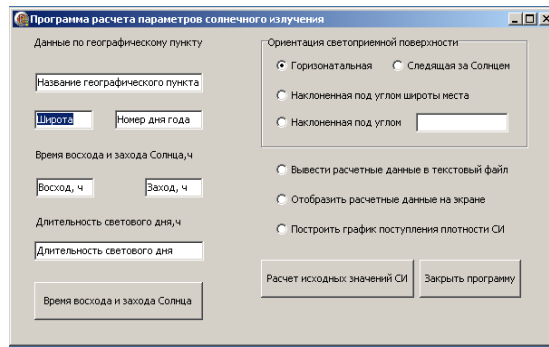


Рис. 1. Основное диалоговое окно программы

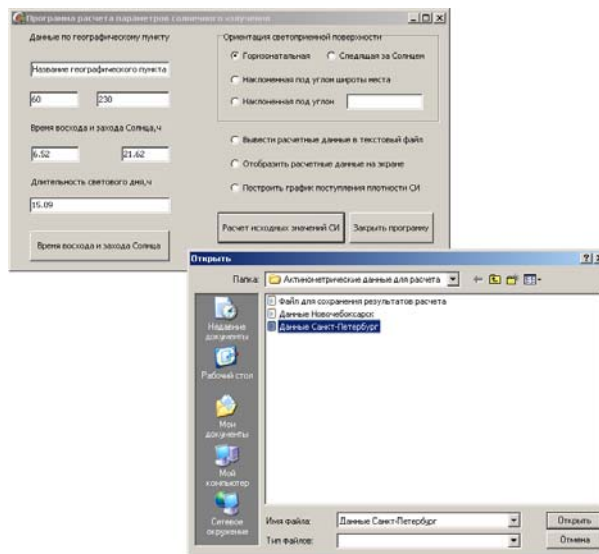


Рис. 2. Выбор файла с наблюдаемыми данными для расчетного географического пункта

Пометка, активирующая команду «Отобразить расчетные данные на экране», позволяет просмотреть часовые плотности потока солнечного излучения и суммы энергии излучения, поступающего на выбранный тип поверхности в течение каждого месяца года (Рис. 3). Расчетные данные для каждого часа и дня года могут быть также записаны в выбранный пользователем файл для дальнейшей обработки, построения графиков и анализа (команда «Вывести расчетные данные в текстовый файл»). Команда «Построить график поступления плотности СИ» строит график поступления солнечного излучения на выбранный тип поверхности для введенного ранее номера дня года.

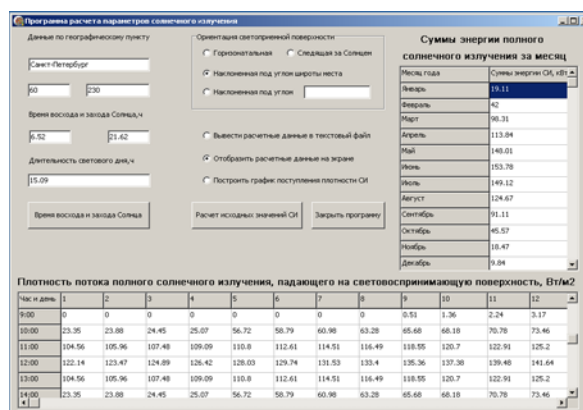


Рис. 3. Отображение результатов расчета на экране компьютера

С использованием данной программы были выполнены оценки поступления ресурса солнечного излучения на различно ориентированные поверхности ФЭМ в метеоусловиях г. Санкт-Петербург. Расчеты выполнялись для каждого часа года для поверхностей, ориентированных на юг, юго-восток (юго-запад), восток (запад), северо-восток (северо-запад), и расположенные под следующими углами к горизонту: 20°, 30°, 40°, 50°, 60° и 90°.

Интегральные значения энергии потока солнечного излучения, поступающего на южно ориентированную поверхность в течение месяца и года, приведены в Таблице 1 и на Рис. 4. Анализ результатов расчета показал, что оптимальными углами наклона поверхности к горизонту являются: угол 40° - обеспечивающий максимальный приход энергии СИ в течение всего года, угол 30° - обеспечивающий максимальный приход энергии СИ в период с 1 апреля по 1 октября. Таким образом, дальнейшие результаты расчетов для других ориентаций поверхностей представлены именно для указанных углов наклона на Рис. 5 и Рис. 6.

Таблица 1. Поступление энергии СИ, кВт·ч/м²

Месяц года	Угол наклона поверхности к горизонту					
	20°	30°	40°	50°	60°	90°
Январь	13,48	15,24	16,69	17,77	18,46	17,99
Февраль	32,65	35,82	38,25	39,86	40,62	37,61
Март	82,17	87,77	91,5	93,24	92,95	80,29
Апрель	111,81	114,44	114,74	112,7	108,37	84,29
Май	159,95	159,7	156,55	150,23	140,93	101,24
Июнь	171,97	169,3	164,36	156,14	144,88	100,37
Июль	165,26	163,63	159,43	152,07	141,77	99,93
Август	127,58	129,1	128,04	124,42	118,34	89,08
Сентябрь	82,3	86,2	88,31	88,56	86,96	71,92
Октябрь	36,7	39,7	41,89	43,2	43,58	39,25
Ноябрь	13,73	15,26	16,49	17,36	17,87	17,04
Декабрь	7,02	7,93	8,67	9,23	9,59	9,38
Год	1004,62	1024,09	1024,92	1004,78	964,32	748,39
с 1 апреля по 1 октября	818,87	822,37	811,43	784,12	741,25	546,83

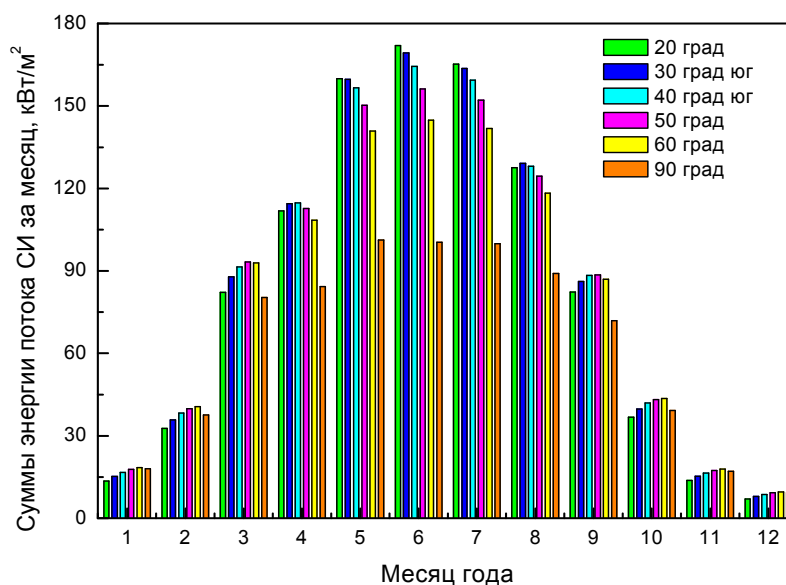


Рис. 4. Поступление энергии СИ на ориентированную на юг поверхность

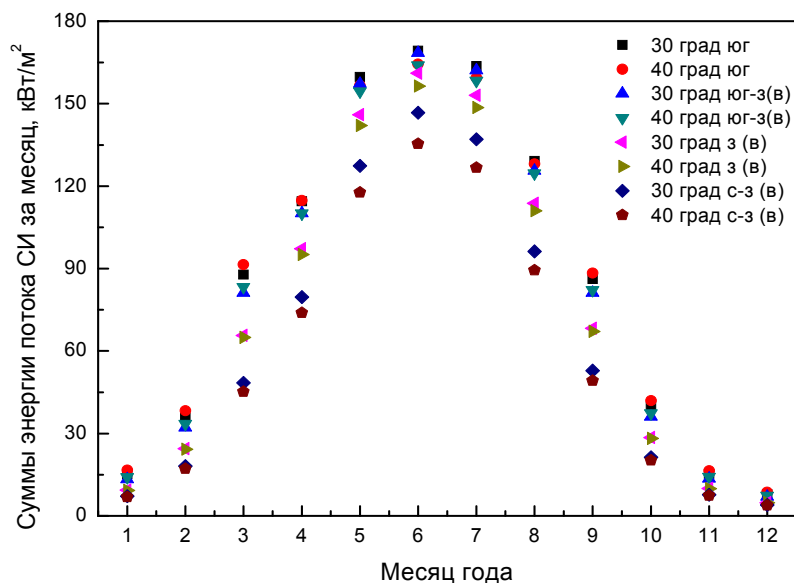


Рис. 5. Сравнение поступления энергии СИ за месяц на ориентированные поверхности, наклоненные под углом к горизонту на 30° и 40°

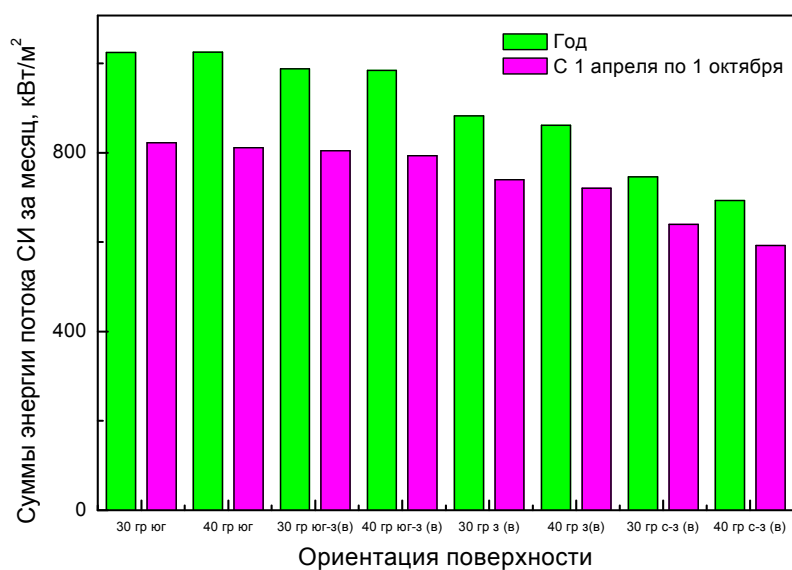


Рис. 6. Сравнение поступления энергии СИ на ориентированные поверхности в течение года и в период с 1 апреля по 1 октября

Анализ данных графиков Рис. 5 и Рис. 6 подтвердил, что максимальное поступление СИ наблюдается на южно ориентированные поверхности, наклоненные под углом 40°, при необходимости получения максимального прихода энергии излучения в период с 1 апреля по 1 октября поверхность должна быть наклонена под углом 30° к горизонту.

В Таблице 2 представлены данные по годовому и в период с 1 апреля по 1 октября поступлению энергии СИ, а также по выработке электроэнергии с 1м² рассматриваемых поверхностей с углом наклона 30° и 40°. КПД принималось из расчета 15% [10].

Таблица 2

Ориентация поверхности	Угол наклона, °	Поступление энергии, кВт·ч/м ²		Выработка энергии, кВт·ч/м ²	
		За год	1.04 - 1.10	За год	1.04 - 1.10
Юг	30	1024,09	822,37	153,6	123,4
	40	1024,92	811,43	153,7	121,7
Юго-запад (восток)	30	987,65	804,51	148,1	120,7
	40	983,81	793,7	147,6	119,1
Запад (восток)	30	882,16	739,33	132,3	110,9
	40	861,44	720,22	129,2	108,0
Северо-запад (восток)	30	746,33	639,74	111,9	96,0
	40	692,86	592,31	103,9	88,8

Большой интерес к использованию солнечной энергетики в малой архитектуре представляет использование, так называемых, легких разборных конструкций с солнечными модулями, например для покрытия летних кафе, эксплуатируемых как в теплый период с 1 апреля по 1 октября, так и в течение всего года. Пример такой конструкции представлен на Рис. 7. Как видно из рисунка, легкие конструкции кафе легко пристраиваются к зданию, создавая дополнительную площадь к основному помещению.

Крыша кафе в данном случае может быть изготовлена из обычных строительных материалов, или может быть использована для размещения прочных солнечных модулей, выдерживающих значительные статические нагрузки, а также обеспечивающих дополнительное поступление света по сравнению с непрозрачными стройматериалами. Недостаток использования ФЭМ в данном случае заключается в возможном частичном затенении модулей от зданий, расположенных напротив кафе. Поэтому была решена задача расчета поступления энергии СИ на крышу кафе с учетом частичного затенения в процессе функционирования и оценки влияния затенения на снижение электроэнергии, вырабатываемой системой электроснабжения на основе фотоэлектрических модулей.



Рис. 7. Покрытия летних террас кафе

Схема выработки электрической энергии представлена на Рис. 8.



Рис. 8. Выработка электрической энергии

При расчетах было принято, что крыша кафе ориентирована на юг, и наклонена под углами 20° , 30° , 40° и 50° к горизонту. Ширина кафе принималась равной 2 м, длина крыши кафе (вдоль дома) 10 м, расстояние до здания, отбрасывающего тень на крышу кафе 25 м, превышение здания над нижней точкой крыши кафе 10 м. При расчетах использовалась схема, представленная на Рис. 8. Расчеты проводились для оценки затенения поверхности только в зенитальной плоскости, так как в азимутальной плоскости затенение будет одинаковым по всей длине крыши кафе.

На Рис. 9 введены следующие условные обозначения: L – расстояние между домами (25 м); H – превышение дома над крышей кафе (10 м); L_k – ширина кафе (2 м); X_3 – затененная часть крыши; X_K – ширина крыши кафе.

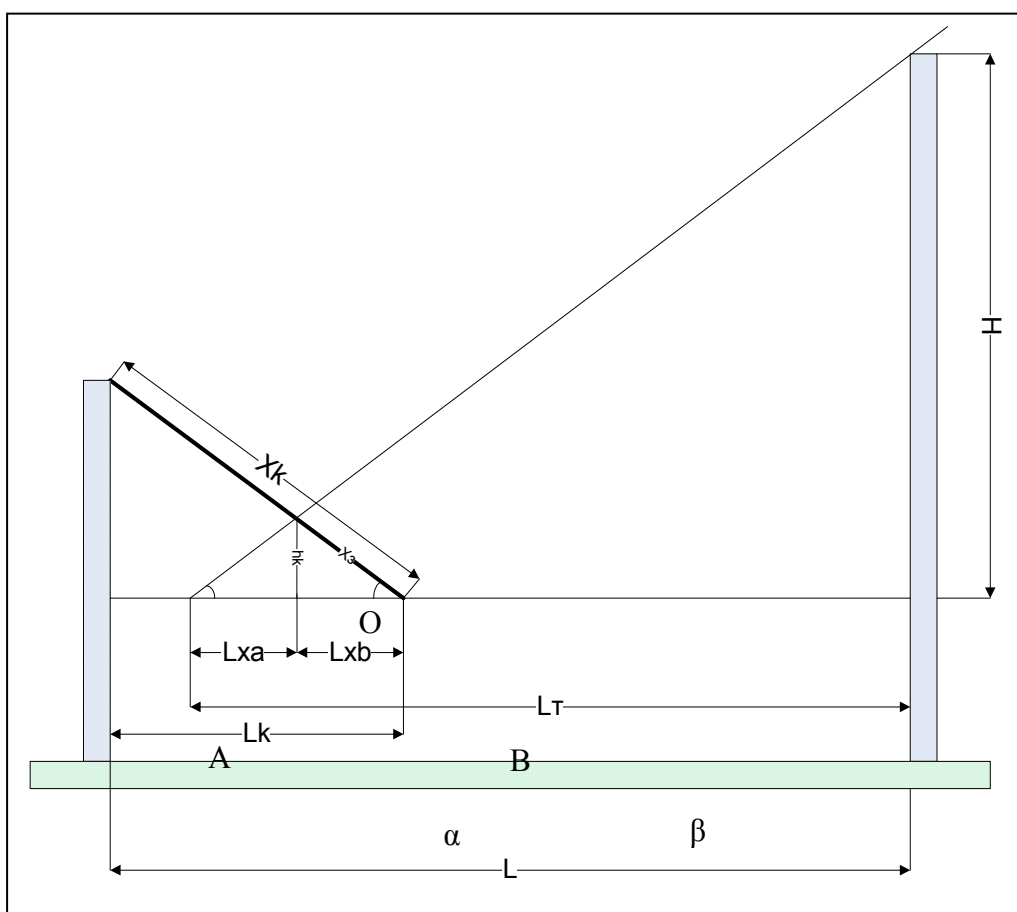


Рис. 9. Схема для расчета затенения модуля

В процессе расчета определялось значение затененной части крыши X_3 для каждого часа года по формуле:

$$X_3 = \frac{L_{xb}}{\cos \beta} \quad (11)$$

где L_{xb} – после преобразований можно выразить из треугольника ABO:

$$L_{xb} = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot (L_k + L_T - L)}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha} \quad (12)$$

В выражение (12) α – определяет угол высоты Солнца над горизонтом; β – угол наклона поверхности к горизонту.

Ширина крыши кафе X_k в зависимости от угла наклона β определяется по формуле:

$$X_k = \frac{L_k}{\cos \beta} \quad (13)$$

Зная движение тени по поверхности солнечных модулей в каждый час года можно определить текущую мощность и электроэнергию, вырабатываемую модулями в течение года и в период с 1 апреля по 1 октября.

Текущая мощность фотоэлектрических модулей в час i :

$$P_i^{\PhiЭМ} = \left[E_{\text{оп}i}^{\text{прп}} \cdot (X_k - X_3) \cdot Z_k + \left(E_{\text{оп}i}^{\text{дифп}} + E_{\text{оп}i}^{\text{отрп}} \right) \cdot (X_k \cdot Z_k) \right] \cdot \eta^{\PhiЭМ} \cdot S^{\PhiЭМ} \quad (13)$$

где Z_k – длина крыши кафе (вдоль дома).

Выработка электроэнергии фотоэлектрическими модулями:

$$W_i^{\PhiЭМ} = \int_{t_1}^{t_2} P_i^{\PhiЭИ} \cdot N^{\PhiЭМ} \cdot dt \quad (14)$$

где $N^{\PhiЭМ}$ – количество солнечных фотоэлектрических модулей, объединенных в системе электроснабжения.

Приведенный выше алгоритм использовался для расчета затенения поверхностей модулей и оценки его влияния на выработку электроэнергии системой электроснабжения на основе модулей MSW-250 с пиковой мощностью 250 Вт и габаритами 1650x990 мм [10]. КПД модуля принималось равным 15%. Все результаты расчета для оценки выработки в течение года и в период с 1 апреля по 1 октября приведены в Таблице 3 и Таблице 4, и на Рис. 10 и Рис. 11.

Таблица 3. Оценка влияния затенения на выработку электроэнергии солнечными модулями, расположенными на крыше кафе в течение года

Поверхность Параметр	Угол наклона поверхности к горизонту, град			
	20	30	40	50
Площадь солнечного модуля, м ²	1.6335	1.6335	1.6335	1.6335
Площадь крыши, м ²	21.28	23.09	26.1	31.09
Количество солнечных модулей, шт	13	14	16	19
Выработка эл.эн. с крыши без затенения, кВт·ч	3206.7	3546.9	4012.6	4685.9
Выработка эл.эн. с крыши с учетом затенения, кВт·ч	2871.7	3162.8	3565.2	4161
Выработка эл.эн. с м ² поверхности крыши, кВт·ч*	134.95	136.98	136.6	133.8
Потери энергии на затенение, %	10.4	10.8	11.1	11.2
Пиковая мощность системы, Вт	3250	3500	4000	4750

Таблица 4. Оценка влияния затенения на выработку электроэнергии солнечными модулями, расположенными на крыше кафе в период 1.04-1.10

Поверхность Параметр	Угол наклона поверхности к горизонту, град			
	20	30	40	50
Площадь солнечного модуля, м ²	1.6335	1.6335	1.6335	1.6335
Площадь крыши, м ²	21.28	23.09	26.1	31.1
Количество солнечных модулей, шт	13	14	16	19
Выработка эл.эн. с крыши без затенения, кВт·ч	2613.8	2848.3	3176.7	3657.9
Выработка эл.эн. с крыши с учетом затенения, кВт·ч	2479,5	2725.3	3060,3	3550,2
Выработка эл.эн. с м ² поверхности крыши, кВт·ч*	116.5	118	117.3	114.2
Потери энергии на затенение, %	0.05	0.04	0.036	0.03
Пиковая мощность системы, Вт	3250	3500	4000	4750

*Оценка действительна только для данных параметров расчета

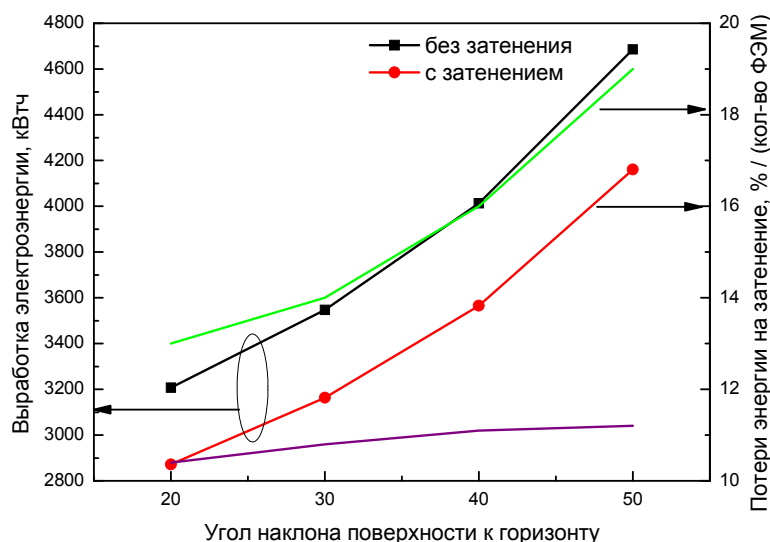


Рис. 10. Оценка влияния затенения на выработку и потери электроэнергии в течение всего года

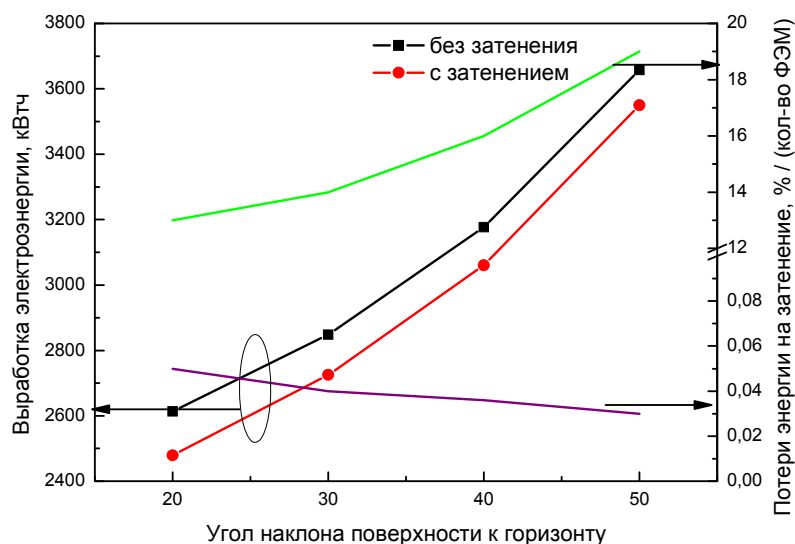


Рис. 11. Оценка влияния затенения на выработку и потери электроэнергии в течение периода с 1 апреля по 1 октября

Наиболее выгодным является размещение временной энергоснабжающей конструкции с отсутствием затенения, например, конструкция может быть установлена в скверах, парках, на территории площадей (Рис. 12).

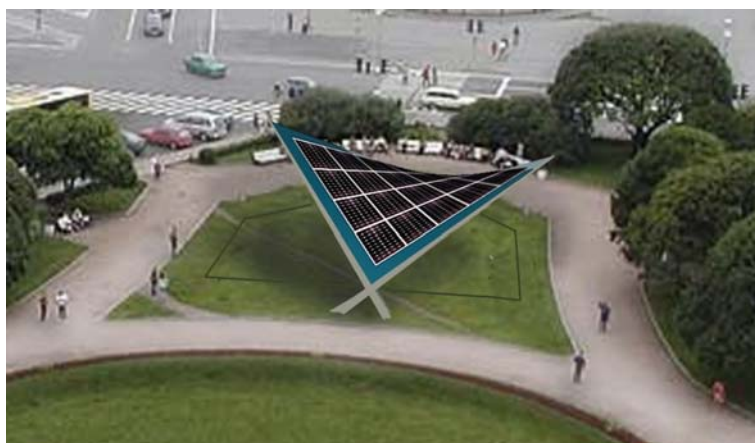


Рис. 12. Энергоснабжающая конструкция покрытия

Также применение энергогенерирующего покрытия целесообразно для отдельных потребителей, таких как светофоры, автобусные остановки и т.д.

Анализ результатов расчетов показал, что оптимальный угол наклона поверхности крыши, обеспечивающий максимальную выработку электроэнергии системой электроснабжения на основе солнечных фотоэлектрических модулей, составляет 30-40°, в этом случае потери энергии вследствие затенения будут практически равными или даже меньше, чем при других углах наклона, а выработка энергии с условного м² будет большей.

Рациональное использование выработанной солнечными модулями электроэнергии в системах электроснабжения (СЭС) является отдельной многокритериальной задачей, решению которой сегодня уделяется пристальное внимание специалистов всего мира.

Так, в настоящее время выделяют следующие основные типы СЭС:

– соединенные с сетью – системы, которые передают всю выработанную электроэнергию непосредственно в централизованную систему электроснабжения (ЦСЭ);

– неподключенные к сети, или автономные – системы, в которых вся выработанная электроэнергия хранится, перераспределяется и потребляется в замкнутом, изолированном контуре.

При применении солнечной энергии для электроснабжения целесообразно использовать автономные СЭС с возможностью резервного питания от ЦСЭ. В этом случае в системе должны быть предусмотрены следующие функциональные элементы:

– аккумуляторные батареи, позволяющие накапливать избыток выработанной ФЭМ в светлое время электроэнергии и обеспечивать потребителя, когда энергии недостаточно, например, в вечернее и ночное время суток;

– инвертор – для преобразования электроэнергии постоянного тока, вырабатываемой ФЭМ, в переменный ток для питания различных электронных приборов;

– устройство автоматики и управления – для контроля и автоматического регулирования и управления процессами преобразования, накопления и перераспределения энергии.

В качестве примера функционирования автономной СЭС для обеспечения освещения произведена оценка часов работы светильников различной мощности в течение года и в период с 1.04 - 1.10 от 1м² ФЭМ, наклоненного под углом 40° к горизонту (Табл. 5). Выработка энергии модулем в течение года составляет 154 кВт·ч/м², с апреля по октябрь 122 кВт·ч/м² (Табл. 2). Расчеты проведены без учета потерь энергии в дополнительном электрическом оборудовании системы.

Таблица 5. Оценка числа часов работы электрических светильников

Параметр	Мощность ламп, Вт							
	20	50	100	150	200	300	400	500
Число часов работы в течение года, ч	7700	3080	1540	1027	770	513	385	308
Число часов работы с 1.04 - 1.10, ч	6100	2440	1220	813	610	407	305	244

Анализ расчетных данных показал, что вырабатываемой с 1 м² ФЭМ энергии достаточно для обеспечения работоспособности различного вида светильников. При этом целесообразно использовать энергосберегающие лампы, например, на основе светодиодов, потребляемая мощность которых намного меньше, чем у традиционных ламп накаливания. Применение СЭС для электроснабжения малых архитектурных форм в период с 1.04 - 1.10, когда вечерние и ночные часы не так продолжительны, позволит почти полностью удовлетворить потребности в освещении даже при условии функционирования небольшого числа модулей.

Заключение

Несмотря на то, что традиционные энергетические носители сегодня несравненно дешевле энергии возобновляемых источников, задача науки – это развитие, продвижение новейших технологий возобновляемой энергетики. Архитектурная наука может определить спрос на подобные системы солнечной энергетики. Осознание

ответственности за среду обитания для будущих поколений не должно затмеваться прагматичными расчетами сиюминутной финансовой выгодой.

Ответственное энергопользование на настоящий момент сложно мотивировать экономически. Легкие монтажные конструкции, несущие на себе элементы систем солнечного энергоснабжения, появившись в городской среде исторического центра, смогут нести на себе идею декларирования принципов ответственности каждого человека за качество жизни будущих поколений.

Особое значение приобретает экологическое воспитание человека, формирование определённых норм поведения в отношении к природной среде. Стереотипы сознания, должны быть ориентированы на сохранение и разумное культивирование природной среды, регенерационные возможности которой не беспредельны.

Необходимо учитывать конечный срок эксплуатации любых строительных конструкций, возможность их повторного использования после переработки в пределах искусственной среды или усвоение естественной средой. Разборка временных энергогенерирующих конструкций будет подразумевать начало нового цикла использования. Полностью монтажные, подобные конструкции могут быть успешно перенесены на новое место с приданием им новой функции. Одно из требований экологической архитектуры – рециклируемость материалов – в данной ситуации будет выполнено полностью.

Выводы

- Действующим режимам охраны объектов культурного наследия накладываются значительные ограничения на расположение технологического оборудования непосредственно на ограждающих конструкциях зданий, поэтому наиболее целесообразным является применение отдельных энергогенерирующих конструкций, а также материалов класса BIPV, обеспечивающих «маскирующие» приемы технологического дооснащения ограждающих конструкций зданий.

- Климатические особенности Северо-Западного региона дают малые возможности для эффективной работы систем солнечного энергоснабжения зданий. Расчет прихода солнечной энергии подтвердил целесообразность сезонности эксплуатации систем солнечного энергообеспечения.

Статья подготовлена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых (МК-2041.2012.8) и РФФИ, грант 12-08-00354.

Литература

1. Закон Санкт-Петербурга «О границах зон охраны объектов культурного наследия на территории Санкт-Петербурга и режимах использования земель в границах указанных зон и о внесении изменений в Закон Санкт-Петербурга» «О Генеральном плане Санкт-Петербурга и границах зон охраны объектов культурного наследия на территории Санкт-Петербурга»: закон от 24 декабря 2008 [Сетевой ресурс]. - URL: <http://www.assembly.spb.ru/manage/page?tid=633200192>
2. Петербургская стратегия сохранения культурного наследия. Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 01.11.2005. – N 1681 [Сетевой ресурс]. – URL: <http://kqiop.ru/rus/strategy/>
3. [Сетевой ресурс]. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

4. Мургул В.А. Повышение энергоэффективности реконструируемых жилых зданий исторической застройки Санкт-Петербурга [«Архитектон: известия вузов» № 40 Декабрь 2012](http://archvuz.ru/2012_4/7) [Сетевой ресурс]. - URL: http://archvuz.ru/2012_4/7
5. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011– 239 с.
6. Мургул В.А. Возможности использования солнечной энергии для энергоснабжения жилых зданий исторической застройки Санкт-Петербурга и улучшения качества городской среды. Международный электронный научно-образовательный журнал «Архитектура и современные информационные технологии» АМИТ [Сетевой ресурс]. - URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2013/1kvart13/murgul/murgul.pdf>
7. Кондратьев К.Я. Лучистая энергия солнца. – Л.: Гидрометиздат, 1954. – 600 с.
8. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. - Л.: Гидрометиздат, 1968. - 231 с.
9. Елистратов В.В., Аронова Е.С. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения: учебное пособие, под ред. В. В. Елистратова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 164 с.
10. Фирма Солнечный ветер, г. Краснодар [Сетевой ресурс]. – URL: <http://www.solwind.ru/>
11. Фролов И.Т. Перспективы человека. - М.: Политиздат, 1983. - 348 с.
12. Научно-прикладной справочник по климату СССР в 30 томах. Многолетние данные. – СПб.: Гидрометеиздат, 1990.
13. Пивоварова З.И. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 127 с.

References

1. *Zakon Sankt-Peterburga «O granicah zon ohrany ob"ektov kul'turnogo nasledija na territorii Sankt-Peterburga i rezhimah ispol'zovanija zemel' v granicah ukazannyh zon i o vnesenii izmenenij v Zakon Sankt-Peterburga» «O General'nom plane Sankt-Peterburga i granicah zon ohrany ob"ektov kul'turnogo nasledija na territorii Sankt-Peterburga»* [The law of St.-Petersburg «About borders of zones of protection of objects of a cultural heritage in territory of St.-Petersburg and modes of use of the grounds in borders of the specified zones and about modification in the Law of St.-Petersburg» «About the General plan of St.-Petersburg and borders of zones of protection of objects of a cultural heritage for territories of St.-Petersburg»]. Available at: <http://www.assembly.spb.ru/manage/page?tid=633200192>
2. *Peterburgskaja strategija sohraneniya kul'turnogo nasledija. Postanovlenie Pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 01.11.2005* [The Petersburg strategy of preservation of a cultural heritage. The governmental order of St.-Petersburg from 11/1/2005 -N 1681]. Available at: <http://kgiop.ru/rus/strategy/>
3. Murgul V.A. *Povyshenie jenergojektivnosti rekonstruiruemyh zhilyh zdaniy istoricheskoj zastrojki Sankt-Peterburga «Arhitekton: izvestija vuzov» № 40 Dekabr' 2012* [Improvement of the energy efficient properties of the houses in the historical area of Saint-Petersburg] «Arkhitekton: izvestiya vuzov» № 40 Dekabr 2012. Available at: http://archvuz.ru/2012_4/7
4. Elistratov V.V. *Vozobnovlyayemaya energetika* [Renewable energy]. Saint-Petersburg, 2011, 239 p.

6. Murgul V.A. *Vozmozhnosti ispolzovaniya solnechnoy energii dlya energosnabzheniya zhilykh zdaniy istoricheskoy zastroyki Sankt-Peterburga i uluchsheniya kachestva gorodskoy sredy* [Capabilities of using the solar energy for energy supply of the dwelling buildings of the historical area of Saint-Petersburg and for city environment quality improvement] *Mezhdunarodnyy elektronnyy nauchno-obrazovatelnyy zhurnal «Arkhitektura i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii» AMIT*. Available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2013/1kvart13/murgul/murgul.pdf>
7. Kondratyev, K.Ya. *Luchistaja jenergija solnca* [The radiant energy of the sun]. Leningrad, 1954, 600 p.
8. Sivkov S.I. *Metody rascheta harakteristik solnechnoj radiacii* [Methods of calculation of characteristics of solar radiation]. Leningrad, 1968, 231 p.
9. Elistratov V.V., Aronova E.S. *Solnechnye jenergoustanovki. Ocenka postuplenija solnechnogo izlucheniya* [Solar power plants. Estimation of the amount of solar radiation]. Saint-Petersburg, 2012, 164 p.
10. *Firma Solnechnyy veter, g. Krasnodar* [Firm the Solar wind, Krasnodar]. Available at: <http://www.solwind.ru/>
11. Frolov I.T. *Perspektivy cheloveka* [Prospects of the person]. Moscow, 1983, 348 p.
12. *Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR v 30 tomah. Mnogoletnie dannye* [The scientifically-applied directory on a climate of the USSR in 30 volumes. Long-term data]. Saint-Petersburg, 1990.
13. Pivovarova Z.I. *Klimaticheskie harakteristiki solnechnoj radiacii kak istochnika jenergii na territorii SSSR* [Climatic data of solar radiation as an energy source in the USSR]. Leningrad, 1988, 127 p.

ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Е.С. Аронова

К.т.н., научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: earonova@mail.ioffe.ru

В.А. Мургул

Соискатель, старший преподаватель кафедры «Архитектурно-строительных конструкций», СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: october6@list.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

E.S. Aronova

Ph.D., researcher, Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, Saint-Petersburg, Russia
e-mail: earonova@mail.ioffe.ru

V. Murgul

Post-graduate student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), Saint-Petersburg, Russia

e-mail: october6@list.ru