

УДК 621.472–025.13:620.9

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДВИЖНЫХ И НЕПОДВИЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Гросс Карлис Агрис<sup>1,2</sup>,  
kgross@rtu.lv

Крауиньш Петр Янович<sup>3</sup>,  
peterkrau@tpu.ru

Крауиньш Дмитрий Петрович<sup>3</sup>,  
dpkrauinjsh@tpu.ru

Кухта Мария Сергеевна<sup>3</sup>,  
eukuh@mail.tomsknet.ru

Соколов Александр Петрович<sup>3</sup>,  
iscanderaga@rambler.ru

<sup>1</sup> Рижский технический университет,  
Латвия, LV-1658, г. Рига, ул. Калькю, 1.

<sup>2</sup> Университет Монаш,  
Австралия, Scenic Blvd, Clayton VIC 3800, Австралия.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Солнечная энергетика как альтернативный возобновляемый энергоресурс в настоящее время развивается быстрыми темпами. В этой связи дополнительных исследований требует специфика включения солнечной энергетики в районы Западной Сибири как дополнительного экологически чистого энергоресурса. Актуальность обусловлена также необходимостью создания эффективных моделей приема солнечной энергии, которые бы соответствовали требованиям технической эстетики и обеспечивали высокий уровень визуальной комфортности.

**Цель исследования:** оценить способы повышения энергоэффективности подвижных и неподвижных солнечных панелей в Томске.

**Задачи:** оценить специфику климатических, синоптических, географических, метеорологических условий Томска; рассмотреть виды конструкций солнечных панелей (неподвижных и подвижных) и их дизайн в архитектурной среде; исследовать динамику вариаций мощности солнечных панелей при сезонных колебаниях в Томске; предложить и научно обосновать вариант рационального размещения солнечных панелей на архитектурном сферическом куполе.

**Объект:** солнечные панели.

**Предмет исследования:** энергоэффективность солнечных панелей различных конструкций для энергоснабжения жилых комплексов в Томске.

**Методика:** метод параллельного проектирования мехатронных систем, компаративный метод, методы инженерных наук, метод моделирования.

**Результаты.** Предложено рациональное распределение солнечных панелей на сферическом архитектурном куполе с учетом климатических, синоптических, географических, метеорологических условий в Томске. Определен коэффициент фактической инсоляции в Томске. Проведен сравнительный анализ подвижных и неподвижных солнечных панелей, и выявлены особенности их размещения в архитектурной среде. Выработаны рекомендации по использованию солнечных панелей, и определены границы их применения с учетом минимального и максимального количества солнечных дней в исследуемом регионе.

**Новизна результатов** представлена в теоретических обобщениях в области конструирования солнечных панелей, позволяющих повысить энергоэффективность: для подвижной солнечной панели с помощью экваториального монтирования; для неподвижной солнечной панели с помощью рационального размещения солнечных панелей на поверхности сферического купола здания.

**Ключевые слова:**

Солнечная энергетика, фотовольтаика, солнечная панель (фотоэлектрическая панель), коэффициент фактической инсоляции, сферический архитектурный купол.

### Введение

Солнце является источником жизни на Земле и тесно связано с рождением и бытием культур. Мифы народов мира насыщены солнечной семантикой: Ра в Египте, Гелиос в Греции, Сурья в Индии – это далеко не полный перечень солнечных ликов древних культур. Религиозные и метафизи-

ческие свойства солнца в настоящее время обрели прагматическое звучание в связи с потребностью поиска новых экологически чистых источников энергии. В современном мире широкое распространение получают альтернативные возобновляемые источники энергии, использующие энергию Солнца [1–3].

Солнечная энергия поступает на Землю в виде ультрафиолетового, видимого света и инфракрасного излучения. В нашем регионе у земной поверхности (при высоте Солнца от  $10^\circ$  до  $57^\circ$ ) на долю ультрафиолетового излучения приходится 1 %, на видимый свет – 40 %, на инфракрасное излучение – 59 %. За пределами земной атмосферы поток излучения составляет  $1394 \text{ Вт/м}^2$  (солнечная постоянная). Проходя через атмосферу, 30–40 % этой энергии рассеивается, и на поверхность Земли на уровне моря в ясный день поступает  $836\text{--}976 \text{ Вт/м}^2$  прямой радиации. Продолжительность солнечного излучения и его интенсивность зависят от времени года, погодных условий и географического положения местности. Около 25 % поверхности Земли получают прямое солнечное излучение в течение всего дня, однако в большинстве стран продолжительность действия прямого солнечного света и интенсивность излучения меньше. Приход солнечного излучения к земной поверхности зависит от прозрачности атмосферы, количества и формы облаков, формирование которых определяется синоптическими условиями.

К достоинствам солнечной энергетики можно отнести полную экологическую безопасность, доступность и возобновляемость (скорость восстановления энергии сопоставима со скоростью ее истощения). К недостаткам относятся: нерегулярность поступления; огромное рассеяние, что требует сравнительно большой поглощаемой поверхности; трудности, связанные с проблемой аккумуляции.

К перспективам развития солнечной энергетики относятся: возможность замещения нефтепродуктов [4]; обеспечение потребностей в электроэнергии в странах с дефицитом собственных энергоресурсов (например, Индия) [5–7]; увеличение КПД фотоэлемента, максимальный уровень которого сегодня достигает 44,7 % (компания CEA-LetiSoitec); здоровье населения, что обусловлено экологической чистотой солнечного энергоресурса. Отдельно рассматриваются вопросы использования фотоэлектрической энергии для оказания помощи при стихийных бедствиях в отдаленных районах [8].

К основным видам солнечной энергетики относятся фотовольтаика (преобразование энергии фотонов); теплоэнергетика (преобразование тепла нагреваемых Солнцем элементов); термоэнергетика (использование энергии водяного пара выделяемого с поверхности нагретой солнцем); аэроэнергетика (преобразование солнечной энергии в энергию воздушных потоков). Фотоэлектрические установки производят более 5 % энергии в европейских странах, и зарубежными учеными исследуется эффективность фотоэлектрических панелей в зависимости от массы воздуха и климатических условий [9]. В статье исследуются проблемы фотовольтаики и специфика использования солнечной энергии видимого света в Томске.

Основная цель исследования – научно обосновать способы использования солнечной энергии в Томске и предложить варианты конструкций солнечных панелей, способных обеспечить эффектив-

ный прием и использование энергии видимого света для жилых помещений в качестве дополнительного альтернативного возобновляемого источника электроэнергии.

#### Климатические и географические координаты исследования.

##### Определение коэффициента фактической инсоляции

Координаты Томска составляют  $56^\circ 29' 54''$  северной широты и  $84^\circ 58' 27''$  восточной долготы, Максимальный угол подъема Солнца над горизонтом в Томске летом составляет  $57,00299^\circ$ . Максимальный угол подъема Солнца зимой  $10,00229^\circ$ . Динамика изменения среднего значения полной радиации  $\text{кВт}\cdot\text{ч/м}^2$  в день в зависимости от месяца года для  $56^\circ$  северной широты представлена на рис. 1. Коэффициент трансмиссии составляет 0,7 (данные по [10]).

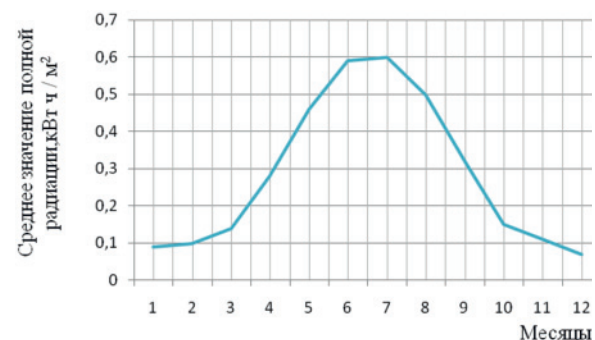


Рис. 1. Динамика изменения средних значений полной радиации

Fig. 1. Dynamics of changes in average values of full radiation

На основании исследований отмечено, что в целом в районе Томска наблюдается достаточно устойчивый радиационный режим с минимальными колебаниями, как месячных, так и суточных значений суммарной радиации в марте [11]. Особенностью радиационного режима в районе Томска является смещение максимума суточной суммарной радиации на июнь–июль.

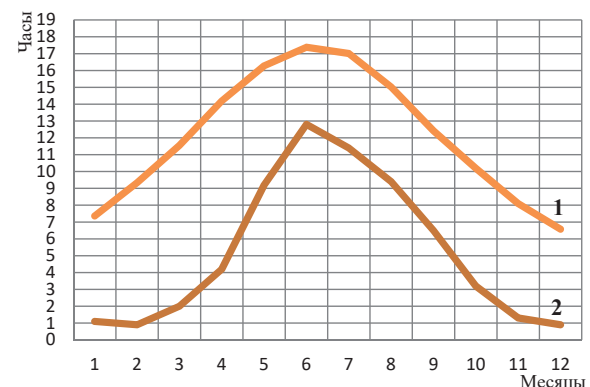
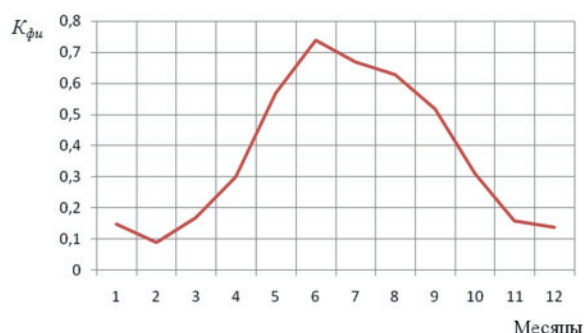


Рис. 2. Освещенность Солнцем для Томска: 1 – продолжительность светового дня; 2 – среднесуточное количество солнечных часов

Fig. 2. Solar illumination for Tomsk: 1 is the light day duration; 2 is the average daily amount of sun-dials

Наблюдается сложная зависимость суточной суммарной солнечной радиации в течение года от типа воздушных масс, которая отражает особенности циркуляции атмосферы над регионом [11].

Продолжительность светового дня и среднесуточное количество солнечных часов, в течение которых прямые солнечные лучи достигают поверхности Земли, для Томска представлены на рис. 2 (усредненные данные о погоде за последние три года). Из этих данных следует, что минимальная продолжительность светового дня приходится на декабрь–январь (6:56–7:36 ч), максимальная продолжительность светового дня – с марта по сентябрь (11:55–17:42 ч).



**Рис. 3.** Изменения коэффициента фактической инсоляции в Томске

**Fig. 3.** Changes of actual insolation factor in Tomsk

На основании данных рис. 1 рассчитано изменение коэффициента фактической инсоляции  $K_{фн}$  в течение года в Томске (рис. 3), минимальное значение которого – 0,09 – приходится на февраль, а максимальное – 0,74 – на июль (данные 2016 г.)

#### Сравнительный анализ подвижной и неподвижной солнечной панели

Эффективность работы солнечной панели жилого дома определяется ее положением относительно Солнца. Фактическая мощность выработки солнечных панелей и величина их зарядного тока зависят от угла падения и плотности солнечного освещения, на которую влияет состояние атмосферы (облачность, атмосферные осадки, влажность и другие климатические факторы). Выделяют подвижные солнечные панели, поворачивающиеся за Солнцем, и неподвижные солнечные панели.

**Подвижные солнечные панели** управляются специальным устройством, позволяющим следить за положением солнца и разворачивать солнечные панели так, чтобы солнечный свет падал на них перпендикулярно ее рабочей поверхности, что позволяет увеличить выработку солнечной энергии на 25–30 %. Солнечную панель с помощью специальных управляющих устройств необходимо расположить так, чтобы обеспечить максимальную энергоэффективность выработки солнечной энергии в дневном и в годовом цикле. Изменение солнечного излучения в пасмурные и ясные дни предполагает различные алгоритмы слежения за Солнцем [12].

Панели, оснащенные системой двухосевого солнечного трекера, позволяющего определить направление движения Солнца, и следящим приводом, регулирующим положение панели, используются на юге Бразилии [13]. В Алжире проведены исследования влияния угла наклона и ориентации на максимальную мощность солнечной панели и представлены модели слежения панели за траекторией Солнца. Эффективность обеспечивается поддержанием панели перпендикулярно солнечным лучам, поэтому для определения угла азимута, угла наклона солнечных углов и наклона панели отслеживается траектория движения Солнца каждый час в течение дня с использованием программного обеспечения Matlab [14]. Проведенный канадскими исследователями анализ модели солнечной панели позволил сделать вывод о том, что стратегия слежения за Солнцем в зените для пасмурных или преимущественно пасмурных дней летом не выгодна [15]. Сравнительные исследования спецификации работы солнечных панелей с функцией отслеживания Солнца в холодных (Германия) и жарких (Египет) странах показали, что перегрев панелей может затруднить эксплуатацию кристаллических кремниевых панелей из-за чрезмерного воздействия солнечной радиации в жарком климате [16]. В процессе исследования солнечных панелей в Объединенных Арабских Эмиратах было выявлено, что автономная фотогальваническая система, поддерживаемая одноосной системой слежения, технически и экономически более жизнеспособна по сравнению с системой с двухосевой технологией слежения [17].

В Томском политехническом университете разработана солнечная электростанция с подвижной солнечной панелью, следящая система которой использует экваториальное монтирование – ориентацию конструкции выходной оси одного из приводов вращения (азимут) солнечной панели так, чтобы эта ось была перпендикулярна небесному экватору и, соответственно, параллельна земной оси.

Экваториальное монтирование компенсирует вращение Земли вращением солнечной панели в плоскости небесного экватора, если на эту ось поставить механизм, который поворачивает ее на один оборот за 24 часа в направлении, противоположном вращению Земли. Солнце в этом случае всегда захватывается солнечной панелью. Экваториальное монтирование позволяет использовать только один следящий привод (мехатронный модуль азимута), что снижает затраты на систему слежения (второй привод используется, например, только раз в сутки для корректировки положения системы по прямому восхождению, и этот привод может быть значительно упрощен).

Конструктивно в системе управления солнечными панелями выделяется мехатронный модуль, который управляет солнечными панелями по углу места и азимута.

Мехатронный модуль обеспечивает необходимое позиционирование солнечной панели по сигналам

лам датчика абсолютного положения (например, энкодера) и информации о положении Солнца, поступающей из блока управления. Электрическое питание системы управления осуществляется накопителем энергии, который управляется контроллером питания. Привод солнечной панели обеспечивает как автоматизированное, так и автоматическое управление положением солнечных панелей по углу места и азимута. При автоматическом управлении с максимальным уровнем вырабатываемой электроэнергии надо для каждой координаты вращения (азимут и место) иметь дорогостоящий мехатронный модуль. Мехатронные модули (рис. 4) позиционируют солнечные панели с высокой точностью и тем самым управляют эффективностью генерации электрической энергии, что позволяет получать стабильный уровень электрической энергии [18–20]. При экваториальном монтаже может быть применен упрощенный привод по углу места (без контроллера и без датчика абсолютного положения). При автоматизированном управлении положение системы по углу места (например, раз в три дня) корректирует человек (оператор).



Рис. 4. Блок-схема мехатронного модуля солнечной панели

Fig. 4. Block diagram of the mechatronic module of solar panel

Одной из важных частей в системе слежения за Солнцем (мехатронный модуль) является высокоточный волновой редуктор, управляемый контроллером по заданной программе и контролируемый по положению – датчиком обратной связи (например, энкодером). Волновой редуктор имеет значительные передаточные отношения и малые угловые люфты (доли угловых минут), высокую угловую жесткость выходного звена и значительный ресурс.

Если подвижная солнечная панель управляется так, чтобы ее плоскость всегда оставалась перпендикулярной лучу от центра диска Солнца, то энергоэффективность такой системы будет максимальной. Мощность, вырабатываемая такой подвижной солнечной панелью на полюсе и на экваторе, отличается незначительно (до 5 %).

Недостатком подвижной солнечной панели со следящей системой является то, что она располагается рядом с жилым комплексом, требует отдельного защищенного пространства (рис. 5) и является уязвимой для ветра.

Неподвижная солнечная панель составляет единство с жилым объектом (располагается на крыше здания), что обеспечивает выполнение тре-

бований эстетики к архитектурным сооружениям и высокий уровень визуальной комфортности [21]. Крыши составляют 20–25 % общей площади городских площадей и предоставляют возможность для устойчивого развития солнечной энергетики. На эффективность солнечных панелей влияет рабочая температура фотоэлектрических модулей, которая связана с тепловыми взаимодействиями между оболочкой здания и элементами панели, а также цветом панели [22]. Специфика использования солнечных панелей на крышах городских районов в Непале позволяет решить проблему освещения городов и сельских районов в темное время [23]. Солнечные панели, составляющие единое целое с архитектурными комплексами, рассматриваются современными дизайнерами как инновационная техника для производства чистой возобновляемой энергии. Исследование строительных интегрированных солнечных панелей методом моделирования с учетом климата, угла наклона, азимутального угла и типа ячеек в Средиземноморском регионе позволяют определить граничные параметры температурных режимов функциональности этих панелей [24]. Установка солнечных панелей на крышах школ в Кувейте и исследования, основанные на собранном солнечном облучении, эффективности модульной технологии и эффективности автоматизированных систем очистки, показывают, что коэффициент производительности поддерживался между 0,74 и 0,85 [25].



Рис. 5. Солнечная панель со следящей системой (разработка Томского политехнического университета)

Fig. 5. Solar panel with a tracker system (development of the Tomsk polytechnic university)

Во всех приведенных работах традиционно исследуется плоская крыша, однако в статье исследуется возможность и варианты размещения солнечных панелей на сферическом куполе архитектурного сооружения, что благоприятно воздействует на психику человека. Современные постройки сферической формы составляют 5,2 % от всех строений, созданных человеком. В современных зданиях доминирует прямая линия, в то вре-

ма как купола христианских храмов, своды католических соборов, древние шатры, юрты, яранги тяготеют к биоморфным, криволинейным, сферическим объемам [21].

Установка неподвижных солнечных панелей на сферическом куполе жилого дома создает возможность при рациональном их расположении обеспечить (без дополнительных сложных устройств) требуемые углы падения солнечного луча.

На рис. 6 представлена модель сферического купола. Северная сторона дома не требует солнечных панелей, т. к. солнцем не освещается.

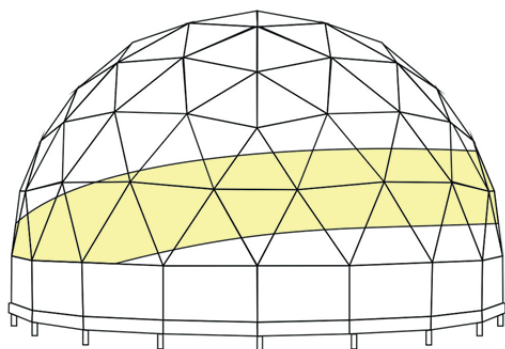


Рис. 6. Модель сферического купола жилого здания (цвет показывает места монтажа солнечных панелей)

Fig. 6. Model of spherical dome of dwelling building (the places of assembling sunny panels are shown in color)

#### Расчет рационального варианта размещения солнечных панелей на сферическом архитектурном куполе

Для расчета рационального размещения солнечных панелей на архитектурном куполе применен метод моделирования, в основу которого положено совмещение небесной сферы с поверхностью сферического архитектурного купола [26]. Предполагаем, что купол является идеальной полусферой, основание которой совпадает с горизонтальной плоскостью. Эту полусферу принимаем за небесную сферу для наблюдателя, находящегося в Томске в точке  $O$ . На рис. 7 обозначены следующие направления:

- $OA$  – на север;
- $OD$  – на восток;
- $OC$  – на запад;
- $OE$  – в зенит;
- линия  $LMN$  – траектория движения Солнца по небесной сфере в день зимнего солнцестояния (22 декабря);
- линия  $CKD$  – траектория движения Солнца по небесной сфере в день весеннего равноденствия (20 марта) в день осеннего равноденствия (23 сентября);
- линия  $EHJ$  – траектория движения Солнца по небесной сфере в день летнего солнцестояния (21 июня);
- высота Солнца над горизонтом в полдень 22 декабря (угол  $ВОМ=11^\circ$ );

- высота Солнца над горизонтом в полдень 20 марта и 23 сентября (угол  $ВОК=34^\circ$ );
- высота Солнца над горизонтом в полдень 21 июня (угол  $ВОН=57^\circ$ );

Угол  $BOL (=49^\circ)$  определяется продолжительностью дня в день зимнего солнцестояния.

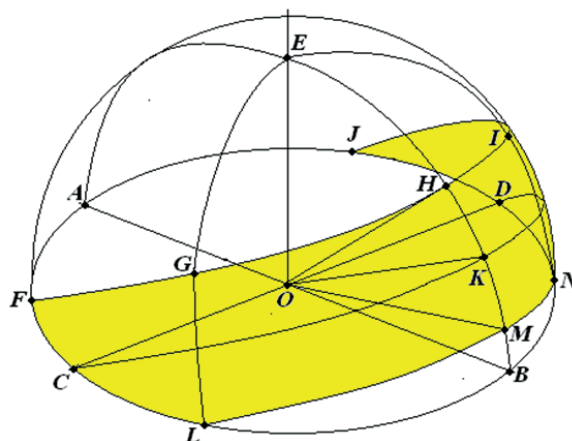


Рис. 7. Зона рационального расположения солнечных панелей без учёта коэффициента фактической инсоляции

Fig. 7. Zone of rational arrangement of sunny panels without taking into account the actual insolation factor

Линия  $OK$  – направление на Солнце в полдень весеннего и осеннего равноденствия.

Если сориентировать солнечную панель перпендикулярно линии  $OK$  и установить неподвижно относительно основания, то без учёта коэффициента фактической инсоляции солнечная панель будет вырабатывать максимальную электрическую энергию в сравнении с другими направлениями ориентации. Определим, насколько различается вырабатываемая энергия для трёх вариантов схем ориентации солнечных панелей на солнце (без учёта коэффициента фактической инсоляции, т. е. предполагается, что все дни солнечные). Результаты расчёта сведены в табл. 1. Коэффициент  $K_{N/S}$  равен отношению максимальной мощности, вырабатываемой солнечной панелью, к её площади. Этот коэффициент учитывает максимальный КПД солнечных элементов, который может быть получен, если день солнечный и лучи Солнца падают перпендикулярно плоскости солнечной панели. При современном уровне промышленного производства солнечных панелей их КПД составляет 12 %. Соответственно коэффициент  $K_{N/S}$  равен примерно  $0,1 \text{ кВт/м}^2$ . Именно это значение использовалось в работе. Максимальный КПД (44 %) достигнут в экспериментальных образцах фотоэлементов, цена которых на несколько порядков выше промышленных образцов. Поэтому в работе он не использовался.

В варианте 2 коэффициент 0,71 учитывает отклонение луча Солнца от линии  $OK$  в течение суток (угол  $\alpha$  меняется от  $-49^\circ$  до  $+49^\circ$ ) и в течение года (угол  $\beta$  меняется от  $-23^\circ$  до  $+23^\circ$ ).

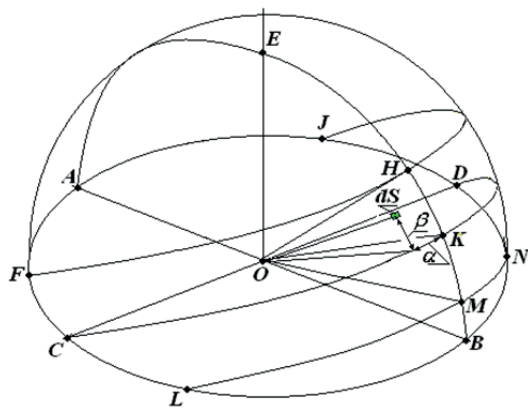
В варианте 3 коэффициент 0,63 учитывает отклонение луча Солнца от линии  $OK$  в течение све-

тового дня зимой (угол  $\alpha$  меняется от  $-49^\circ$  до  $+49^\circ$ ) и в течение года (угол  $\beta$  меняется от  $-23^\circ$  до  $+23^\circ$ ).

**Таблица 1.** Средняя мощность солнечных панелей с учетом географических и климатических особенностей Томска

**Table 1.** Average power of solar panels taking into account the geographical and climatic features of Tomsk

| № варианта<br>Variant | Схемы ориентации солнечных панелей на солнце<br>Schemes of solar panels orientation in the sun                                                                                                                                                                                         | Средняя мощность<br>Average power output |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1                     | Плоская солнечная панель движется, но всё время остается перпендикулярной к лучам Солнца<br>A flat solar panel moves, all the time remaining perpendicular to the sun rays                                                                                                             | $N_{cp} = K_{N/S} K_{\Phi} S_1$          |
| 2                     | Плоская солнечная панель неподвижна и ориентирована перпендикулярно линии $OK$<br>A flat solar panel is immobile and oriented perpendicular to the $OK$ line                                                                                                                           | $N_{cp} = 0,71 K_{N/S} K_{\Phi} S_2$     |
| 3                     | Солнечная панель разбита на элементы, которые равномерно заполняют зону рационального расположения (площадью $S_3$ ) на поверхности сферы<br>A solar panel is divided into elements that uniformly fill the zone of rational arrangement (area of $S_3$ ) on the surface of the sphere | $N_{cp} = 0,63 K_{N/S} K_{\Phi} S_3$     |



**Рис. 8.** Расчётная схема для определения коэффициента  $K_1$ , учитывающего отклонение луча Солнца от линии  $OK$  в течение светового дня зимой (угол  $\alpha$  меняется от  $-49^\circ$  до  $+49^\circ$ ) и в течение года (угол  $\beta$  меняется от  $-23^\circ$  до  $+23^\circ$ )

**Fig. 8.** Calculation scheme for determining the  $K_1$  coefficient that takes into account sun ray deviation from the  $OK$  line during the light day in winter (the angle  $\alpha$  varies from  $-49^\circ$  to  $+49^\circ$ ) and during the year (the angle  $\beta$  varies from  $-23^\circ$  to  $+23^\circ$ ).

Коэффициент  $K_1$  определяется по формуле

$$K_1 = \frac{1}{S_3} \iint \cos \alpha \cos \beta dS,$$

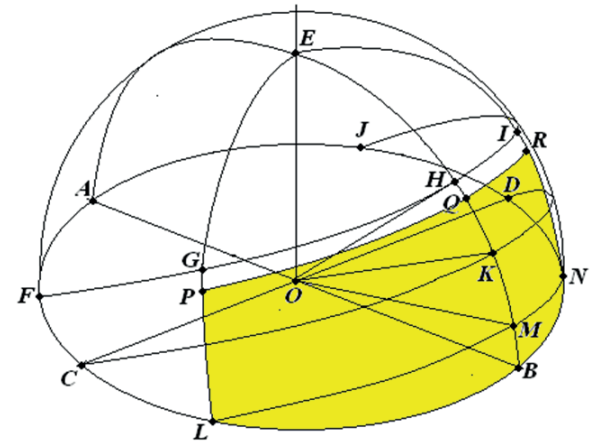
которая использована для определения зоны рационального распределения солнечных панелей по поверхности купола. В расчёт принимались сле-

дующие параметры: вырабатываемая энергия и площадь, занимаемая солнечными панелями. Определялось, какую зону на поверхности купола должны заполнять панели при выполнении следующих требований:

- вырабатываемая энергия должна быть максимальной при минимальном коэффициенте фактической инсоляции, т. е. в зимние месяцы;
- площадь, занимаемая солнечными панелями, должна быть минимальна.

Расчёты показали, что при выполнении этих требований получается рациональная зона, выделенная на рис. 9. Эта зона ограничена линиями:

- $LBN$  – линия горизонта;
- $NR$  – линия, полученная от пересечения поверхности небесной сферы плоскостью, проходящей через наблюдателя (точка  $O$ ), зенит (точка  $E$ ) и точку  $N$  восхода Солнца в день зимнего солнцестояния;
- $LP$  – линия, полученная от пересечения поверхности небесной сферы плоскостью, проходящей через наблюдателя (точка  $O$ ), зенит (точка  $E$ ) и точку  $L$  захода Солнца в день зимнего солнцестояния;
- $PQR$  – линия, отстоящая на равном расстоянии от линии  $GNI$  (траектория движения Солнца по небесной сфере в день летнего солнцестояния), причём площадь фигуры  $PQRING$  равна площади фигуры  $LBNM$ . Линия  $PQR$  совпадает с траекторией движения Солнца по небесной сфере в дни 14 мая и 1 августа.



**Рис. 9.** Зона рационального расположения солнечных панелей с учётом коэффициента фактической инсоляции

**Fig. 9.** Zone of rational arrangement of solar panels taking into account the actual insolation factor

Современные архитектурные купола выполняются из прозрачных материалов. И в этом случае солнечные панели будут частично закрывать доступ света в помещение (выделенная часть полусферы на рис. 9), однако оставляя максимально открытой свету остальную часть купола.

Если основным показателем является максимальная выработка электроэнергии солнечными панелями, то их следует располагать на поверхности купола по площади, ограниченной траекторией

ей движения Солнца в дни зимнего (22 декабря) и летнего (21 июня) солнцестояния. Если (кроме максимальной выработки электроэнергии) в расчёт принимается её усреднение в летний и зимний периоды, то солнечные панели следует располагать по площади, ограниченной: линией горизонта, траекторией движения Солнца (14 мая или 1 августа) и линиями, проходящими через зенит, и точками восхода и захода Солнца в день зимнего солнцестояния (22 декабря).

#### Сравнение солнечных панелей подвижной и неподвижной конструкции

Сравнение солнечных панелей подвижной и неподвижной конструкции приведено в табл. 2. Таблица составлена на основе анализа данных, находящихся в открытых источниках информации. Надёжность для подвижных панелей указана исходя из данных о бесперебойной работе аналогичных систем со следящим электроприводом.

**Таблица 2.** Сравнительные показатели подвижных и неподвижных солнечных панелей

**Table 2.** Comparative parameters of movable and immobile solar panels

| Показатели<br>Indicators                                                                                                              | Подвижные<br>солнечные панели<br>Movable solar panels                             | Неподвижные<br>солнечные панели<br>Immobile solar panels                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Экономичность<br>объёма<br>Economical<br>volume                                                                                       | Требуют отдельного защищенного пространства<br>Require a separate protected space | Совмещены с дизайном архитектурной поверхности<br>Combined with the design of architectural surface |
| Затраты на обслуживание<br>Maintenance costs                                                                                          | Обслуживание сложной мехатроники<br>Servicing complicated mechatronics            | Обеспечение качества рабочей поверхности<br>Assurance of working surface quality                    |
| Надежность<br>Reliability                                                                                                             | 10 лет/10 years                                                                   | 50 лет/50 years                                                                                     |
| Отношение мощности к площади (максимальное, летом), кВт/м <sup>2</sup><br>Power to area ratio (maximum, in summer), kW/m <sup>2</sup> | 0,075                                                                             | 0,048                                                                                               |

#### Выводы

1. Представлена динамика годового изменения коэффициента фактической инсоляции в Том-

ске, что позволяет рационально проектировать солнечные панели с учетом специфики климатических, синоптических, географических, метеорологических условий.

2. Показано, что значение коэффициента фактической инсоляции в Томске изменяется от 0,09 в феврале до 0,74 в июле.
3. Сравнительный анализ подвижной и неподвижной конструкций солнечных панелей показал, что:
  - подвижные солнечные панели требуют отдельного защищенного пространства, обеспечивающего безопасность их работы, а неподвижные панели встроены в архитектурную среду, составляя единое целое с жилым комплексом;
  - подвижные солнечные панели предполагают обслуживание сложной мехатроники (в нашем примере обеспечение работы мехатронного модуля), а в случае с неподвижной панелью это не требуется;
  - надежность работы подвижной солнечной панели составляет 10 лет, а неподвижной – 50 лет;
  - расчетное отношение мощности к площади солнечной панели зимой составляет для подвижной конструкции – 0,075 кВт/м<sup>2</sup>, для неподвижной – 0,048 кВт/м<sup>2</sup>.
4. Энергоэффективность подвижных солнечных панелей повышается при использовании системы слежения за Солнцем, в которой применяется экваториальное монтирование. В этом случае необходим только один следящий привод. Это сокращает затраты энергии на работу следящей системы и, соответственно, повышает энергоэффективность подвижных солнечных панелей.
5. Энергоэффективность неподвижных солнечных панелей обеспечивается за счет их рационального размещения на сферическом архитектурном куполе с учетом геометрии купола и годового цикла Солнца для 56° северной широты.
6. Предложенный вариант сферического архитектурного купола, совмещенного с системой энергообеспечения, позволяет выполнить требования технической эстетики и обеспечить дополнительной экологически чистой энергией жилые помещения. Низкие показатели мощности солнечных панелей зимой для 56° северной широты позволяют использовать их только для аварийного освещения, а высокие летом – для дополнительных бытовых потребностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sampaio P.G., González M.O. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 74. – P. 590–601.
2. Ахмедов Р.Б. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.: Изд-во «Знание», 1988. – 46 с.
3. Уделл С. Солнечная энергия и другие альтернативные источники энергии. – М.: Знание, 1980. – 88 с.
4. Безруких П.П. Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики // Электрика – 2008. – № 9. – С. 3–10.
5. Gupta B.L., Bhatnagar M., Mathur J. Optimum sizing of PV panel, battery capacity and insulation thickness for a photovoltaic ope-

- rated domestic refrigerator // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2014. – V. 7. – P. 55–67.
6. Evaluation of the photovoltaic generation potential and real-time analysis of the photovoltaic panel operation on a building facade in southern Brazil / J.V. Akwa, O. Konrad, G.V. Kaufmann, C.A. Machado // *Energy and Buildings*. – 2014. – V. 69. – P. 426–433.
  7. Design and analysis of rooftop grid tied 50kW capacity Solar Photovoltaic (SPV) power plant/ A.K. Berwal, S. Kumar, N. Kumari, V. Kumar, A. Haleem // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 77. – P. 1288–1299.
  8. Qazi S. Photovoltaics for Disaster Relief and Remote Areas // *Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas*. – 2017. – № 1. – P. 1–30.
  9. Roumpakias E., Zogou O., Stamatelos A. Correlation of actual efficiency of photovoltaic panels with air mass // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 74. – P. 70–77.
  10. Сабади П.П. Солнечный дом. – М.: Строиздат, 1981. – 113 с.
  11. Belan B.D., Sklyadneva T.K. Measurements of total solar radiation near Tomsk // *Atmospheric and oceanic optics*. – 2000. – V. 13. – № 4. – P. 355–359.
  12. Kelly N.A., Gibson Th.L. Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system // *Solar Energy*. – 2009. – V. 83. – Iss. 11. – P. 2092–2102.
  13. Tedesco monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels/ F.M. Hoffmann, R.F. Molz, J.V. Kothe, E.O. Nara, L.P. Carvalho // *Renewable Energy*. – 2017. – V. 83. – Iss. 11. – P. 892–902.
  14. Miloudi L., Acheli D., Chaib A. Solar Tracking with Photovoltaic Panel // *Energy Procedia*. – 2013. – V. 42. – P. 103–112.
  15. Tracking strategy for photovoltaic solar systems in high latitudes / G. Quesada, L. Guillon, D.R. Rousse, M. Mehrtash, P.-L. Paradis // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 103. – P. 147–156.
  16. Sharaf Eldin S.A., Abd-Elhady M.S., Kandil H.A. Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 85. – P. 228–233.
  17. Said Z., Mehmood A. Standalone photovoltaic system assessment for major cities of United Arab Emirates based on simulated results // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – V. 142. – P. 2722–2729.
  18. Степанова Д.Л., Крауиньш П.Я. Оценка КПД волнового редуктора с модифицированным профилем зуба // *Молодёжь и современные информационные технологии*. – 2016. – Т. 1. – С. 154–155.
  19. Степанова Д.Л., Никулин П.А., Крауиньш П.Я. Исследование распределения нагрузки волнового кинематического редуктора с модифицированным профилем зуба и зависимости нагрузочных способностей по отношению к его передаточному числу и габаритным размерам // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. – 2016. – Т. 8. – № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN416.pdf> (дата обращения 12.09.2017).
  20. The influence of surface finishing methods on touch-sensitive reactions / M.S. Kukhta, A.P. Sokolov, P.Y. Krauinsh, A.D. Kozlova, C.K. Bouchard // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – V. 177. – P. 1–6.
  21. Stylization levels of industrial design objects / M.S. Kukhta, A.P. Sokolov, D.P. Krauinsh, C.K. Bouchard // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – V. 803. – P. 1–5.
  22. Alshayeb M., Chang J.D. Photovoltaic Energy Variations Due to Roofing Choice // *Procedia Engineering*. – 2016. – V. 145. – P. 1104–1109.
  23. Gautam B.R., Li F., Ru G. Assessment of urban roof top solar photovoltaic potential to solve power shortage problem in Nepal // *Energy and Buildings*. – 2015. – V. 86. – P. 735–744.
  24. Salem T., Kinab E. Analysis of Building-integrated Photovoltaic Systems: a Case Study of Commercial Buildings under Mediterranean Climate // *Procedia Engineering*. – 2015. – V. 118. – P. 538–545.
  25. Performance evaluation of photovoltaic systems on Kuwaiti schools' rooftop/ A. Al-Otaibi, A. Al-Qattan, F. Fairouz, A. Al-Mulla // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 95. – P. 110–119.
  26. Semantics and technologies in modern design of interior stairs / M. Kukhta, A. Sokolov, E. Pelevin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – V. 93. – № 1. – P. 1–5.

Поступила 19.01.2018 г.

#### Информация об авторах

**Гросс К.А.**, доктор технических наук, профессор института биомеханики и биотехнологии Рижского технического университета; профессор кафедры материаловедения Университета Монаш.

**Крауиньш П.Я.**, доктор технических наук, профессор Отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Крауиньш Д.П.**, кандидат технических наук, доцент Отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кухта М.С.**, доктор философских наук, профессор Отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Соколов А.П.**, кандидат технических наук, доцент Отделения общетехнических дисциплин Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.472–025.13:620.9

## ENERGY EFFICIENCY OF MOVABLE AND IMMOBILE CONSTRUCTIONS OF SOLAR PANELS

Gross Karlis Agris<sup>1,2</sup>,  
kgross@rtu.lv

Petr Ya. Krauinsh<sup>3</sup>,  
peterkrau@tpu.ru

Dmitry P. Krauinsh<sup>3</sup>,  
dpkrauinsh@tpu.ru

Maria S. Kukhta<sup>3</sup>,  
eukuh@mail.tomsknet.ru

Alexander P. Sokolov<sup>3</sup>,  
iscanderaga@rambler.ru

<sup>1</sup> Riga Technical University,  
1, Kalkyu Avenue, Riga, Latvia.

<sup>2</sup> Monash University,  
Scenic Blvd, Clayton VIC 3800, Australia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance of the research.** Solar energy, as an alternative renewable energy resource, is currently developing at a rapid pace. In this connection, the specificity of including solar energy in the areas of Western Siberia as an additional environmentally friendly energy resource requires additional studies. Relevance is caused as well by the need to create effective models of solar energy reception that would meet the requirements of technical aesthetics and provide a high level of visual comfort.

**The aim** of the researches is to estimate the features of different constructions of solar panels and their energy efficiency in Tomsk.

**Objectives:** to assess the specific climatic, synoptic, geographical, meteorological conditions of Tomsk; consider the types of solar panels (fixed and moving) and their design in an architectural environment; to calculate the dynamics of variations in the power of solar panels during seasonal fluctuations in Tomsk; propose and scientifically justify the rational placement of solar panels on an architectural spherical dome.

**The object** of the research is solar panels.

**Subject** of the research is the energy efficiency of solar panels of various constructions for power supply of residential complexes in Tomsk.

**Methods:** method of parallel design of mechatronic systems, comparative method, methods of engineering sciences, modeling method.

**Results.** The proposed topology of distribution of solar panels on a spherical architectural dome is proposed taking into account climatic, synoptic, geographical, meteorological conditions in Tomsk. The authors have carried out the comparative analysis of movable and immobile constructions of solar panels and revealed the features of their location in architectural environment. A calculation scheme is presented for determining actual insolation factor in Tomsk. The authors worked out the recommendations on the use of solar panels and determined the limits of their applicability taking into account the minimum and maximum number of sunny days in the investigated region.

**The novelty of the results** is presented in theoretical generalizations in the field of designing solar panels, which allow increasing energy efficiency for a movable solar panel using equatorial mounting and for immobile solar panel using rational placement of solar panels on the surface of the spherical dome of the building.

### Key words:

Solar energy, photovoltaics, solar panel (photovoltaic panel), actual insolation factor, spherical architectural dome.

### REFERENCES

1. Sampaio P.G., González M.O. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, July 2017, vol. 74, pp. 590–601.
2. Akhmedov R.B. *Netraditsionnye i vozobnovlyayemye istochniki energii* [Non-traditional and renewable sources of energy]. Moscow, Znaniye Publ., 1988. 46 p.
3. Udell S. *Solnechnaya energiya i drugie alternativnyye istochniki energii* [Sunny energy and other alternative sources of energy]. Moscow, Znaniye Publ., 1980. 88 p.
4. Bezrukikh P.P. State and Prospects for Development of Renewable Energy. *Elektrika*, 2008, no. 9, pp. 3–10. In Rus.
5. Gupta B.L., Mayank Bhatnagar, Jyotirmay Mathur. Optimum sizing of PV panel, battery capacity and insulation thickness for a photovoltaic operated domestic refrigerator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014, vol. 7, pp. 55–67.
6. Akwa J.V., Konrad O., Kaufmann G.V., Machado C.A. Evaluation of the photovoltaic generation potential and real-time analysis of the photovoltaic panel operation on a building facade in southern Brazil. *Energy and Buildings*, 2014, vol. 69, pp. 426–433.
7. Berwal A.K., Kumar S., Kumari N., Kumar V., Haleem A. Design and analysis of rooftop grid tied 50kW capacity Solar Photovoltaic (SPV) power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 77, pp. 1288–1299.

8. Qazi S. Photovoltaics for Disaster Relief and Remote Areas. *Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas*, 2017, no. 1, pp. 1–30.
9. Roupakias E., Zogou O., Stamatelos A. Correlation of actual efficiency of photovoltaic panels with air mass. *Renewable Energy*, 2015, vol. 74, pp. 70–77.
10. Sabadi P.R. *Solnechny dom* [Sunny house]. Moscow, Stroizdat Publ., 1981. 113 p.
11. Belan B.D., Sklyadneva T.K. Measurements of total solar radiation near Tomsk. *Atmospheric and oceanic optics*, 2000, vol. 13, no. 4, pp. 355–359.
12. Kelly N.A., Gibson Th.L. Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system. *Solar Energy*, 2009, vol. 83, Iss. 11, pp. 2092–2102.
13. Hoffmann F.M., Molz R.F., Kothe J.V., Nara E.O., Carvalho L.P. Tedesco monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels. *Renewable Energy*, 2013, vol. 83, Iss. 11, pp. 892–902.
14. Miloudi L., Acheli D., Chaib A. Solar Tracking with Photovoltaic Panel. *Energy Procedia*, 2013, vol. 42, pp. 103–112.
15. Quesada G., Guillon L., Rouse D.R., Mehrtash M., Paradis P.-L. Tracking strategy for photovoltaic solar systems in high latitudes. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 103, pp. 147–156.
16. Sharaf Eldin S.A., Abd-Elhady M.S., Kandil H.A. Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions. *Renewable Energy*, 2016, vol. 85, pp. 228–233.
17. Said Z., Mehmood A. Standalone photovoltaic system assessment for major cities of United Arab Emirates based on simulated results. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 142, pp. 2722–2729.
18. Stepanova D.L., Krauinsh P.Ya. Otsenka KPD volnovogo reduktora s modifitsirovannym profilom zuba [Evaluation of the efficiency of a wave reducer with a modified tooth profile]. *Youth and Modern Information Technologies*, 2016, vol. 1, pp. 154–155.
19. Stepanova D.L., Nikulin P.A., Krauinsh P.Ya. Research of the load distribution in wave kinematic reducer with modified tooth profile and dependence the load abilities in proportion to its gear ratio and overall dimensions. *NAUKOVODENIE*, 2016, vol. 8, no. 4. In Rus. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN416.pdf> (accessed 12 September 2017).
20. Kukhta M.S., Sokolov A.P., Krauinsh P.Y., Kozlova A.D., Bouchard C.K. The influence of surface finishing methods on touch-sensitive reactions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177, pp. 1–6.
21. Kukhta M.S., Sokolov A.P., Krauinsh D.P., Bouchard C.K. Stylization levels of industrial design objects. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, pp. 1–5.
22. Alshayeb M., Chang J. D. Photovoltaic Energy Variations Due to Roofing Choice. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 145, pp. 1104–1109.
23. Gautam B.R., Li F., Ru G. Assessment of urban roof top solar photovoltaic potential to solve power shortage problem in Nepal. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 86, pp. 735–744.
24. Salem T., Kinab E. Analysis of Building-integrated Photovoltaic Systems: a Case Study of Commercial Buildings under Mediterranean Climate. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 118, pp. 538–545.
25. Al-Otaibi A., Al-Qattan A., Fairouz F., Al-Mulla A. Performance evaluation of photovoltaic systems on Kuwaiti schools' rooftop. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 95, pp. 110–119.
26. Kukhta M., Sokolov A., Pelevin E. Semantics and technologies in modern design of interior stairs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 93, no. 1, pp. 1–5

*Received: 19 January 2018.*

#### Information about the authors

**Gross Karlis Agris**, Dr. Sc., professor, Riga Technical University; professor, Monash University.

**Petr Ya. Krauinsh**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitry P. Krauinsh**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Maria S. Kukhta**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander P. Sokolov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.