



Надёжное энергоснабжение с использованием ВИЭ-технологий

• • • • • • • • • •

Рецензия эксперта на статью получена 07.06.2018 [Expert review on the article was received on June 07, 2018].

Проблема низкой надёжности энергообеспечения автономных потребителей при использовании возобновляемых источников энергии в суровых климатических условиях большинства регионов Российской Федерации в значительной мере сдерживает широкое внедрение технологий ВИЭ. Для обеспечения безрискового энергоснабжения установки на основе ВИЭ дублируются дизель-электрическими, работающим на моторном топливе, что требует приобретения и хранения запасов дорогостоящего моторного топлива. Замена дублирующих источников на более экономичные — является весьма актуальной задачей. Данная задача рассматривалась ранее в работах [1, 2].

В работе на примере фототермоэлектрической системы исследована возможность обеспечения надёжного энергоснабжения сельского дома путём совместного использования солнечной энергии и энергии сгораемой биомассы, используемых для отопления в зимний период. Подобные виды топлива не яв-

ляются дорогостоящими и широко доступны. По ресурсам биомассы, пригодной для энергетического использования, наша страна находится в числе мировых лидеров [3, 4]. Схема комбинированной солнечно-термоэлектрической системы энергообеспечения приведена на рис. 1.

Анализ солнечной составляющей энергообеспечения

С учётом данных метеорологических наблюдений количества дней с различными условиями облачности энергия, приходящая на поверхность солнечного преобразователя за месяц [5]:

$$Q_{\text{прих.мес}} = Q_{\text{прих.ясн}}(N_{\text{мес}} - N_{\text{обл}}) + Q_{\text{прих.обл}}N_{\text{обл}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{прих.ясн}}$ и $Q_{\text{прих.обл}}$ — значения суммарной радиации, приходящей на поверхность солнечного преобразователя за средний день месяца для условий ясного неба и средних условий облачности; $N_{\text{мес}}$ — количество дней в месяце; $N_{\text{обл}}$ — среднее число пасмурных дней по общей облачности за данный месяц [5, 6].

УДК 621.31

Надёжное энергоснабжение с использованием ВИЭ

С. Е. Щеклеин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой атомных станций и ВИЭ; **А. И. Попов**, к.т.н., доцент кафедры атомных станций и ВИЭ, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ)

Рассмотрена возможность энергоснабжения частного дома с использованием гибридной термоэлектрической и фотоэлектрической технологий. Показано, что большая длительность отопительного периода, характерная для ряда регионов нашей страны создаёт благоприятные условия для применения термоэлектрической технологии. В то же время в период высокой солнечной инсоляции (весна-лето) и низкой потребности в отопительных нагрузках целесообразно использование фотоэлектрической технологии. Установлено, что потребность в электроснабжении может быть обеспечена при эффективности термоэлектрического преобразования полной тепловой энергии сжигаемого топлива более 2%. Использование современного энергоэффективного осветительного, радиотелевизионного, компьютерного оборудования, интернета и средств связи позволяет существенно снизить требуемую электрическую мощность и, как следствие упростить и удешевить стоимость гибридной энергетической установки, а также повысить надёжность гарантированного энергоснабжения с применением местных топлив (дрова, торф и пр.). При этих условиях требуемая эффективность термоэлектрического преобразования для минимального энергообеспечения может быть снижена до 0,5–1%.

Ключевые слова: теплоснабжение, электроснабжение, термоэлектричество, фотоэлектричество, энергоэффективность.

UDC 621.31

Reliable power supply using renewable energy sources

S. E. Shcheklein, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources; **A. I. Popov**, PhD, Assistant Professor of the Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources, Ural Federal University (UrFU)

The possibility of supply of private homes using hybrid thermoelectric and photovoltaic technologies. It is shown that the long duration of heating period, certain regions of our country creates favourable conditions for the use of thermoelectric technology. At the same time in a period of high solar insolation (spring-summer) and low heating loads it is advisable to use photovoltaic technology. Found that the demand for electricity can be achieved when the efficiency of thermoelectric conversion complete thermal energy fuel burn more than 2%. The use of modern energy-efficient lighting, radio-television, computer equipment, Internet and communication tools can significantly reduce the required electrical power, and consequently simplify and reduce the cost of a hybrid power plant, as well as improve reliability of guaranteed power supply with the use of local fuels (peat, firewood, etc.). Under these conditions the required efficiency of thermoelectric conversion for minimum energy can be reduced to 0.5–1%.

Keywords: heating, electricity, thermoelectricity, photovoltaics, energy efficiency.

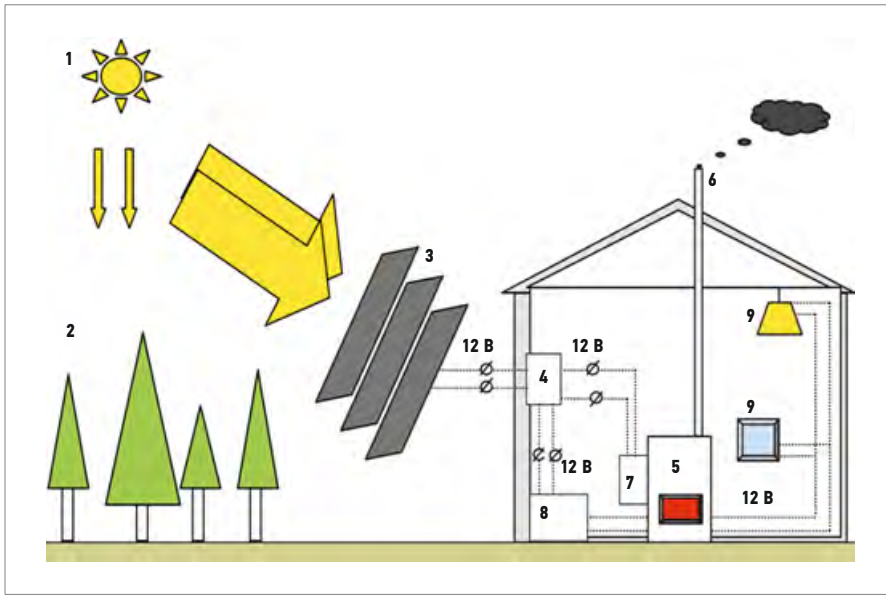


Рис. 1. Комбинированная солнечно-термоэлектрическая система энергообеспечения (1 — Солнце; 2 — лесная биомасса; 3 — фотоэлектрические преобразователи; 4 — контроллер зарядки аккумуляторной батареи; 5 — дровяная печь; 6 — дымовая труба; 7 — термоэлектрический преобразователь; 8 — аккумуляторная батарея; 9 — потребители электрической энергии)

На рис. 2 приведены расчётные значения выработки электрической энергии современных ФЭП (КПД = 15%) для суммы радиации, приходящей на плоскость определяемой по формуле (1) и данным [5]. Результаты расчётов выработки электрической энергии за год для нормального падения солнечного излучения на поверхность приведены в таб. 1.

Анализ отопительной составляющей энергообеспечения

Суровые климатические условия многих регионов России обуславливают необходимость отопления жилых и производственных помещений в течение длительного времени; подачи значительно большего количества тепловой энергии, чем в здания аналогичного уровня теплозащитности в более мягких климатических условиях [7]. Объективным показателем суровости климата является параметр ГСОП — градусо-сутки отопительного периода, который характеризуют суровость климата какого-либо региона (чем выше ГСОП, тем холодней). В зарубежной практике используется подобный показатель Heating Degree Days (HDD), достаточно просто пересчитываемый в принятый в РФ показатель ГСОП [8]. Для России ГСОП существенно (в полтора-два раза) выше, чем для всех европейских стран и США.

Объём тепловой энергии за отопительный период [кВт·ч/год] без учёта потерь тепла на вентиляцию, канализацию и водоснабжение, инфильтрацию через элементы тепловой защиты в соответ-

ствии с принятой в России методикой [9] составит:

$$Q_{\text{отгод}} = 0,024 \text{ ГСОП } V_{\text{от}} k_{\text{об}}, \quad (2)$$

где ГСОП — градусо-сутки отопительного периода [°C·сут./год]:

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) z_{\text{от}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{от}}$ и $z_{\text{от}}$ — средняя температура наружного воздуха [°C] и продолжительность отопительного периода [сут/год], принимаемые по своду правил для пе-

риода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более 8 °C; $t_{\text{в}}$ — расчётная температура внутреннего воздуха здания, °C; $k_{\text{об}}$ — удельная теплозащитная характеристика здания, [Вт/(м³·°C)]:

$$k_{\text{об}} = K_{\text{ком}} K_{\text{общ}}, \quad (4)$$

$$K_{\text{общ}} = \frac{1}{A_{\text{н}}^{\text{сум}}} \sum_i \left(n_{t,i} \frac{A_{\text{ф},i}}{R_{\text{о},i}} \right), \quad (5)$$

где $R_{\text{про}i}$ — приведённое сопротивление теплопередаче i -го фрагмента теплозащитной оболочки здания, (м²·°C)/Вт; $A_{\text{ф},i}$ — площадь соответствующего фрагмента теплозащитной оболочки здания, м²; $V_{\text{от}}$ — отапливаемый объём здания, м³; $n_{t,i}$ — коэффициент, учитывающий отличие внутренней или наружной температуры у конструкции от принятых в расчёте ГСОП; $K_{\text{ком}}$ — коэффициент компактности здания [м⁻¹]:

$$K_{\text{ком}} = \frac{A_{\text{н}}^{\text{сум}}}{V_{\text{от}}}. \quad (6)$$

Удельный расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период [кВт·ч/(м²·год)]:

$$q_{\text{от}} = \frac{Q_{\text{от}}^{\text{год}}}{A_{\text{от}}}. \quad (7)$$

Реально существующие строения, особенно сооружённые в сельской местности методом индивидуального строительства, имеют достаточно низкие значения параметра R в диапазоне от 0,5 до 2,0 [10].

Приход энергии и возможная выработка электроэнергии за год

табл. 1

Параметр	Екатеринбург	Сочи	Волгоград	Санкт-Петербург
Приход энергии на поверхность за год, МДж/м²	4145	4526	4480	3683
Возможная выработка (КПД ФЭУ равно 15 %) электроэнергии за год, кВт·ч/м²	173	189	186	153

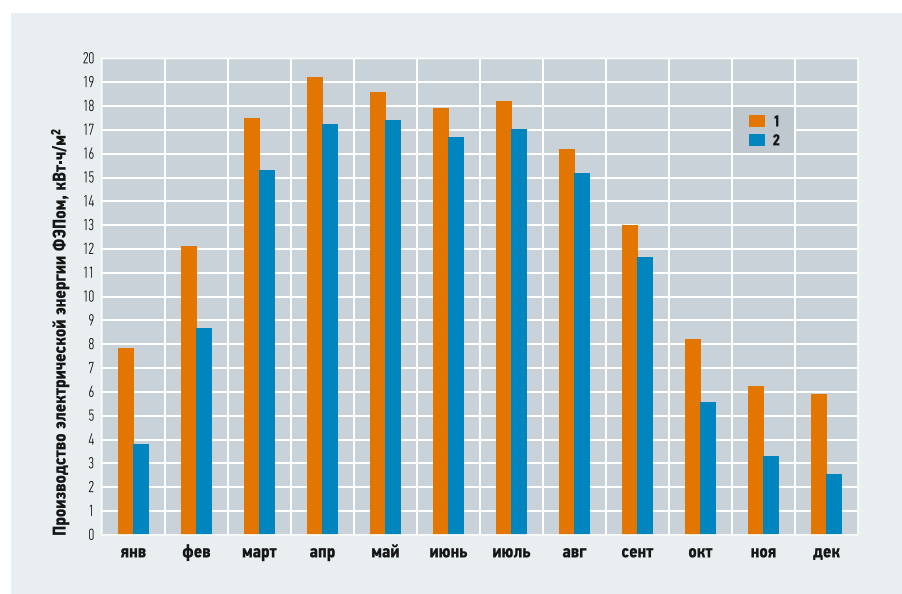


Рис. 2. Месячное производство электрической энергии фотоэлектрическим преобразователем для условий Уральского региона (1 — для ясного неба; 2 — с учётом облачности)

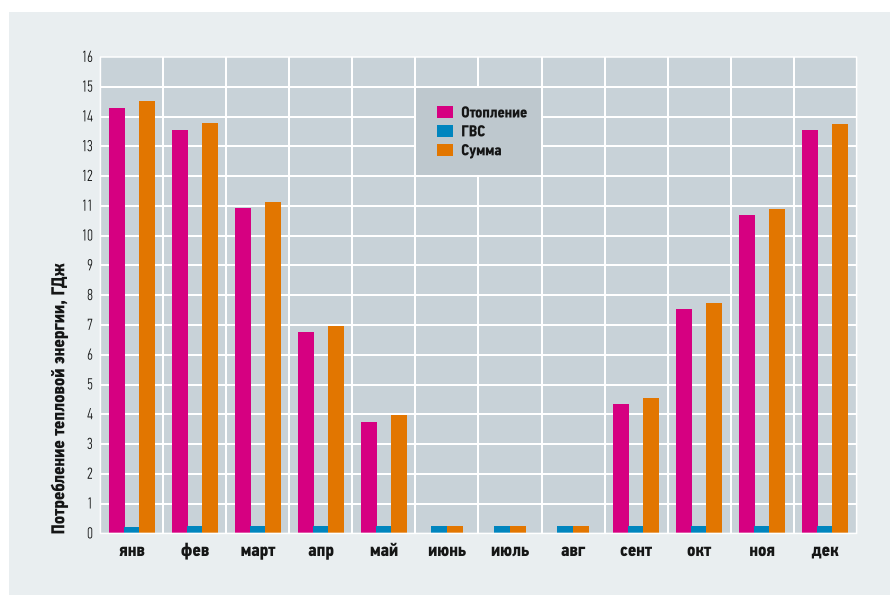


Рис. 3. Месячное потребление тепловой энергии домами

С учётом неравномерности теплотребления, мощность отопительной системы [кВт] должна быть повышена с целью покрытия пиковых тепловых нагрузок:

$$P_{\max} = P_{\text{ср}} K_{\text{нер}} = \frac{Q_{\text{от}}^{\text{год}} K_{\text{нер}}}{24 z_{\text{от}}}. \quad (8)$$

На рис. 3 показаны расчётные значения месячного потребления тепловой энергии для дома с достаточно низким уровнем тепловой защищённости ($R = 1$).

Анализ графика показывает, что основной вклад в теплотребление сельского дома вносит отопительная нагрузка, существенно изменяющаяся по месяцам отопительного сезона. Максимальные объёмы теплотребления приходятся на зимние месяцы и имеют достаточно высокие значения, что позволяет рассмотреть возможность использования термического потенциала данной энергии для одновременного производства электрической энергии при помощи современных термоэлектрических генераторов (ТЭГ).

Для указанного дома (40 м^2 , $R = 1$) для климатических условий Уральского региона ($ГСОП = 5500$) ежемесячное потребление тепловой энергии (рис. 4) позволит произвести с использованием ТЭГ определённый объём электроэнергии [11]:

$$P = UI = (2N\alpha)^2 \Delta t^2 \frac{m}{r} (1+m)^2, \quad (9)$$

где P — мощность, отдаваемая ТЭГ во внешнюю цепь, Вт; a — коэффициент Зеебека (коэффициент термоЭДС), Вт/°С; m — отношение сопротивлений нагрузки и термоэлектрического модуля; Δt — разность температур нагреваемого и охлаждаемого электродов ТЭГ, °К; N — число пар термоэлектрических элементов



в ТЭГ; r — внутреннее электрическое сопротивление модуля при рабочих температурах, Ом.

Общая эффективность работы термоэлектрической станции (ТТЭС) оценива-

Анализ графика показывает, что основной вклад в теплотребление сельского дома вносит отопительная нагрузка, существенно изменяющаяся по месяцам отопительного сезона. Максимальные объёмы теплотребления приходятся на зимние месяцы, что позволяет рассмотреть возможность использования термического потенциала этой энергии для одновременного производства электроэнергии при помощи ТЭГ

ется величиной коэффициента полезного действия:

$$\eta_{\text{ТЭГ}} = \frac{P}{Q} 100 \%, \quad (10)$$

где P и Q — электрическая мощность в нагрузке и общая тепловая мощность, выделяющаяся при сгорании топлива.

Современные ТЭГ, основанные на использовании полупроводниковых материалов (теллурид висмута Bi_2Te_3), обеспечивают преобразование тепловой энергии в рабочем диапазоне температур ($< 250^\circ\text{C}$) в электрическую с эффективностью ($\eta_{\text{ТЭГ}}$) на уровне 3% [12–13].

Обсуждение полученных результатов

Вследствие естественных законов изменения в годовом цикле приходов солнечной радиации, температуры окружающего воздуха и потребностей в отоплении —

возникает возможность эффективного комбинированного производства электрической энергии с использованием фотоэлектрических преобразователей (в летний период) и тепловой энергии отопительных устройств (в зимний период) с использованием термоэлектрических генераторов. В обобщённом виде объём произведённой комбинированной установкой энергии является функцией от ряда следующих факторов:

$$\mathcal{E} = \Phi(q_{\text{сол}}, F_{\text{ФЭП}}, \eta_{\text{ФЭС}}, V_{\text{от}}, ГСОП, R, \eta_{\text{печ}}, \eta_{\text{ТЭГ}}, \eta_{\text{ТТЭС}}), \quad (11)$$

где $q_{\text{сол}}$ — удельный приход солнечной энергии, кДж/(м²·мес.); $F_{\text{ФЭП}}$, $h_{\text{ФЭС}}$ — площадь поверхности и КПД ФЭП; $V_{\text{от}}$, $ГСОП$ и R — отапливаемый объём, климатический фактор (ГСОП) и сопротивление теплового контура здания; $\eta_{\text{печ}}$, $\eta_{\text{ТЭГ}}$, $\eta_{\text{ТТЭС}}$ — КПД отопительных устройств, ТЭГ и системы нагрева и охлаждения электродов ТЭГС.

В летний период производимая ФЭС энергия превышает уровень лимита более чем в два раза. Снижение данной неравномерности может быть достигнуто повышением эффективности термоэлектрической генерации в зимний период

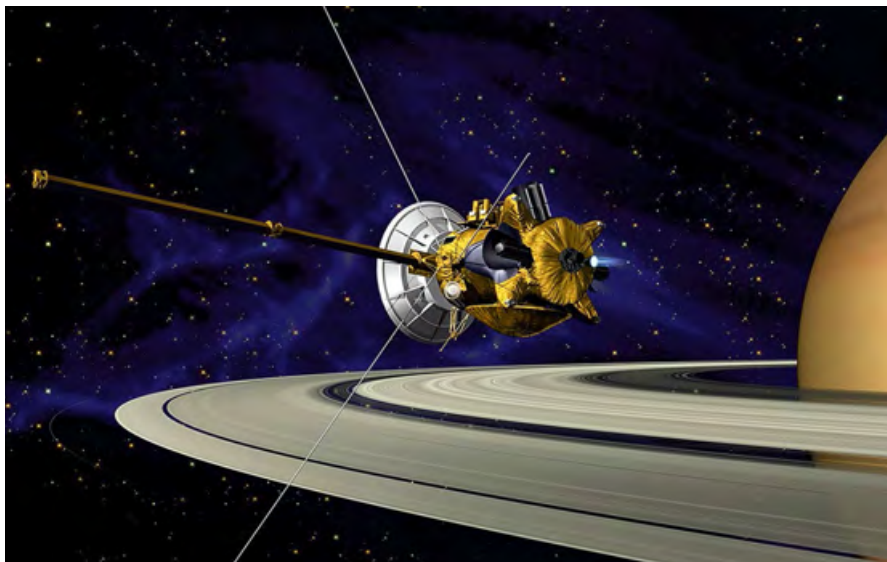
Так как в реальных условиях мощность, вырабатываемая ТЭГС, значительно снижается при уменьшении разности температур и невозможности подвода к ТЭГС всего объёма тепловой энергии от отопительного устройства, фактические значения общего электрического КПД ТЭГС существенно ниже, чем потенциально возможно для современных термоэлектрических преобразователей [2]. На рис. 4 приведены результаты расчётного производства электроэнергии для рассматриваемого дома — для климатических условий Уральского региона. Расчёты показывают, что социальный минимум энергопотребления (50 кВт·ч в месяц) может быть обеспечен ТЭГС с КПД = 1% и ФЭС с КПД = 15% общей площадью 6 м².

Приведённые данные показывают достаточность данной системы для обеспечения социального лимита энергопотребления во все месяцы года. Очевидно, что в летний период производимая ФЭС энергия превышает уровень лимита более чем в два раза. Снижение данной неравномерности может быть достигнуто повышением эффективности термоэлектрической генерации в зимний период. Для этого необходимо:

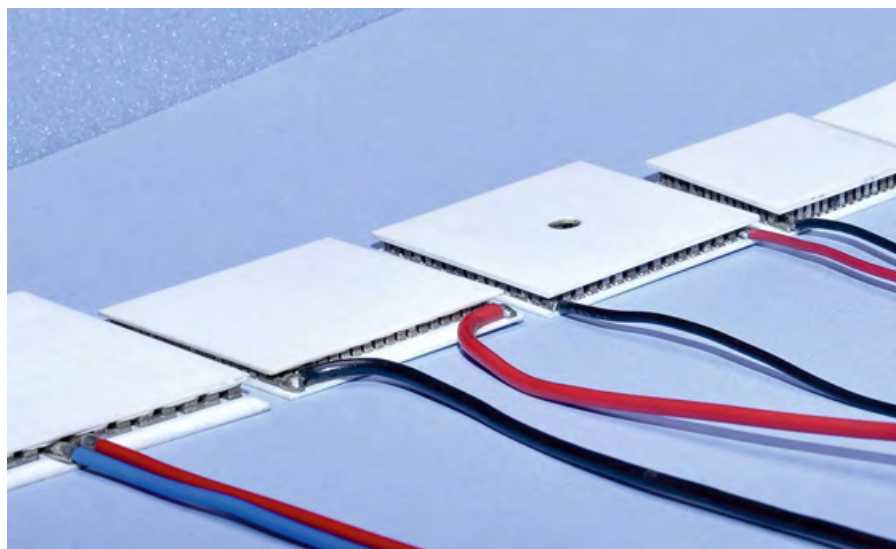
- организация подвода тепловой энергии в непрерывном режиме, что достаточно легко обеспечивается для отопительных устройств на газообразном и жидком



Рис. 4. Годовое производство электрической энергии комбинированной термофотоэлектрической установкой (1 — ФЭС с КПД = 15%, площадью 6 м²; 2 — ТЭГС с КПД = 1%; 3 — общее производство ФЭС и ТЭГС; 4 — ФЭС с КПД = 15%, площадью 1 м²)



Исследовательский центр NASA Langley разработал и использовал при создании автоматической межпланетной станции Cassini (исследовала Сатурн в 2004–2017 годах) термоэлектрический материал с использованием микрочернистых зерен серебра теллурида, покрытых наночастицами висмута. Подобные материалы имеют уникальные преимущества в прямом преобразовании любого уровня тепловой энергии в электрическую и твердое охлаждение в обратном режиме



Термоэлектрические охладители сэндвич-типа используются в полупроводниковой отрасли

топливе, а также автоматизированных котлов на твердом пеллетном топливе (в случае использования традиционного дровяного топлива данная задача решается применением котлов медленного горения типа «Ермак»);

- поддержание в процессе горения максимально возможного градиента температур между нагреваемым и охлаждаемым электродам ТЭГ;
- поддержание возможно более низкой температуры охлаждаемого электрода;
- использование большей части тепловой энергии, образующейся при сжигании топлива для подвода к нагреваемым электродам ТЭГ;
- исключение потребления электрической энергии на собственные нужды установки.

Реализация только двух последних мероприятий позволит вырабатывать на отопительной нагрузке в январе-декабре более 2 кВт·ч в сутки, что соответствует электрическому КПД печи выше 2% и позволит обеспечить необходимый уровень энергоснабжения дома при снижении установленной мощности фотоэлектрической станции.

Выводы

1. Необходимый для полноценной жизнедеятельности объём тепловой энергии в северных климатических условиях в зимний период достаточно велик и позволяет ставить вопрос о создании когенерационных термоэлектрических установок, генерирующих электрическую энергию на отопительной нагрузке. Особое значение данная проблема имеет в сельской местности из-за относительно низкой тепловой защиты частных домов, больших расходов тепловой энергии и топлива.
2. В летний период года приход солнечной энергии в большинстве регионов страны достаточен для использования современных фотоэлектрических преобразователей.
3. Для реализации возможностей термоэлектрического электроснабжения автономных потребителей необходима разработка специализированных печных систем, обеспечивающих в течение всего периода горения топлива постоянный уровень температуры ТЭГ и максимальное поступление к ним выделяющейся при горении топлива тепловой энергии.
4. Прогресс в области создания малоэнергоёмкого осветительного оборудования, телевизионной, холодильной и другой бытовой техники и средств связи делает возможным использование современных полупроводниковых фото- и термоэлектрических преобразователей для производства необходимого количества электрической энергии при достижении полного коэффициента преобразования теплоты в электричество более 0,5–1,0%. ●

-
1. Щеклеин С.Е. О возможностях термоэлектрического электроснабжения автономных потребителей в условиях сурового климата / В сб.: Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий. Сб. докл. III Всероссийской научной конференции с международным участием. 2017. С. 235–242.
 2. Никитин А.Д., Щеклеин С.Е., Немихин Ю.Е., Муродов У.Ш., Холлов Н.Б. Экспериментальное исследование характеристик отопительно-варочной термоэлектрической печи // Альтернативная энергетика и экология, 2016. №19–20. С. 29–40.
 3. Безруких П.П., Арбузов Ю.Д. и др. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Под ред. Безруких П.П. — СПб.: Наука, 2002. 314 с.
 4. Холмаков А.А., Щеклеин С.Е. Энергетический потенциал биомасс России / Энергетика настоящего и будущего: Сб. мат. I Евроазиатской выставки и конференции. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. С. 58–62.
 5. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 9. — М.: Гидрометеоиздат, 1990. 557 с.
 6. NASA Langley Atmospheric Sciences Data Center (Distributed Active Archive Center). Web-source: eosweb.larc.nasa.gov. Access data: 18.04.2018.
 7. Хилл Ф., Гэдди К. Сибирское бремя. Просчёты советского планирования и будущее России: Пер. с англ. — М.: «Форум по международным отношениям», 2007. 328 с.
 8. Ливчак В.И. Градусо-сутки отопительного периода как инструмент сравнения уровня энергоэффективности зданий в России и в других странах // Энергосбережение, 2015. №6. С. 20–25.
 9. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуал. редакция СНиП 23-01-99.
 10. Башмаков И.А. Энергоэффективность зданий в России и в зарубежных странах // Энергосбережение, 2015. №3. С. 20–23.
 11. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: Справ. пособ. — СПб.: Криотерм, 2004. 53 с.
 12. Montecucco A., Siviter J., Knox A.R. Constant heat characterisation and geometrical optimization of thermoelectric generators. Applied Energy. 2015. No. 149. Pp. 248–258.
 13. Su C.Q., Wang W.S., Liu X., Deng Y.D. Simulation and experimental study on thermal optimization of the heat exchanger for automotive exhaust-based thermoelectric generators. Case Studies in Thermal Engineering. 2014. No. 4. Pp. 85–91. References — see page 93.

Reliable power supply using renewable energy sources. Pp. 75–79.

S.E. Shcheklein, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department;
A.I. Popov, PhD, Assistant Professor, Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources, Ural Federal University (UrFU)

1. Shcheklein S.E. *O vozmozhnostyah termoelektricheskogo jelektronnabzhenija avtonomnykh potrebitel'ev v usloviyah surovogo klimata* [On the possibilities of thermoelectric power supply of autonomous consumers in conditions of severe climate]. V sb. *"Jenergo- i resurso-jeffektivnost' malozhaznykh zhilykh zdaniy"*. Sb. dokl. III Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Col. vol. "Energy and resource efficiency of low-rise residential buildings". Proc. of III All-Russian scientific conference with international participation]. 2017. Pp. 235–242.
2. Nikitin A.D., Shcheklein S.E., Nemihin Ju.E., Murodov U.Sh., Holov N.B. *Jeksperimental'noe issledovanie harakteristik otopitel'no-varochnoj termoelektricheskoy pechi* [Experimental study of the characteristics of the heating-cooking thermoelectric furnace]. *Alternativnaja jenergetika i jekologija* ["Alternative energy and ecology" Magazine]. 2016. No. 19–20. Pp. 29–40.
3. Bezrukikh P.P., Arbuzov Ju.D. et al. *Resursy i jeffektivnost' ispol'zovaniya vozobnovljajemykh istochnikov jenerгии v Rossii* [Resources and efficiency of renewable energy sources in Russia]. Ed. P.P. Bezrukikh. St. Petersburg. Nauka ["Science" Publishers]. 2002. 314 p.
4. Holmakov A.A., Shcheklein S.E. *Jenergeticheskij potencial biomass Rossii* [Energy potential of Russia's biomass]. *Jenergetika nastojashhego i budushhego: Sb. mater. Pervoj Evroaziatskoj vystavki i konferencii* [Energy of the present and future: Proc. of the First Euro-Asian exhibition and conference]. 2010. Ekaterinburg. UGTU-UIPI. Pp. 58–62.
5. Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR: Seriya 3. Mnogoletnie dannye [Scientific-applied reference book on the climate of the USSR: Third Series. Long-term data]. Part 1–6. Issue 9. Gidrometeoizdat ["Gidrometeoizdat" Publishers]. 1990. 557 p.
6. NASA Langley Atmospheric Sciences Data Center (Distributed Active Archive Center). Web-source: eosweb.larc.nasa.gov. Access data: April 18, 2018.
7. Hill F., Clifford G. Gaddy. *The Siberian Curse: How Communist Planners Left Russia Out in the Cold*. Brookings Institution Press. 2007. 303 p.
8. Livchak V.I. *Graduso-sutki otopitel'nogo perioda kak instrument sravnenija urovnja jenergojeffektivnosti zdaniy v Rossii i v drugih stranah* [Degree-day of the heating season as a tool for comparing the energy efficiency of buildings in Russia and other countries]. *Jenergosberezhenie* ["Energy Saving" Magazine]. 2015. No. 6. Pp. 20–25.
9. Svod Pravil (SP) [Code of practice on design and construction] 131.13330.2012. Stroitel'naja klimatologija. Aktualiz. red. SNiP [Building climatology. Updated version of Building Norms & Regulations (National Codes and Standards of Russia)] 23-01-99.
10. Bashmakov I.A. *Jenergojeffektivnost' zdaniy v Rossii i v zarubezhnykh stranah* [Energy Efficiency of Buildings in Russia and in Foreign Countries]. *Jenergosberezhenie* ["Energy Saving" Magazine]. 2015. No. 3. Pp. 20–23.
11. Termoelektricheskie moduli i ustrojstva na ih osnove: Sprav. posob. [Thermoelectric modules and devices based on them: Reference Guide]. St. Petersburg. IPF "Kriotherm" [Kryotherm Co.]. 2004. 53 p.
12. Montecucco A., Siviter J., Knox A.R. Constant heat characterisation and geometrical optimization of thermoelectric generators. *Applied Energy*. 2015. No. 149. Pp. 248–258.
13. Su C.Q., Wang W.S., Liu X., Deng Y.D. Simulation and experimental study on thermal optimization of the heat exchanger for automotive exhaust-based thermoelectric generators. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2014. No. 4. Pp. 85–91.