

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СУРОВОГО КЛИМАТА

Щеклеин С.Е.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Проблема надежного энергообеспечения автономных потребителей энергии путем использования местных топливных ресурсов в суровых климатических условиях большинства регионов Российской Федерации является весьма актуальной и обострилась в последние годы рыночными подходами в энергетике. В данной работе исследована возможность обеспечения надежного энергоснабжения сельского дома путем использования энергии сгораемой биомассы (дров, торфа и пр.). По ресурсам биомассы, пригодной для энергетического использования, наша страна находится в числе мировых лидеров [1,2]. Культура дровяного отопления сформирована в России в течение многих столетий.

Принципиальная схема системы энергообеспечения с использованием дровяного топлива приведена на (рис. 1).

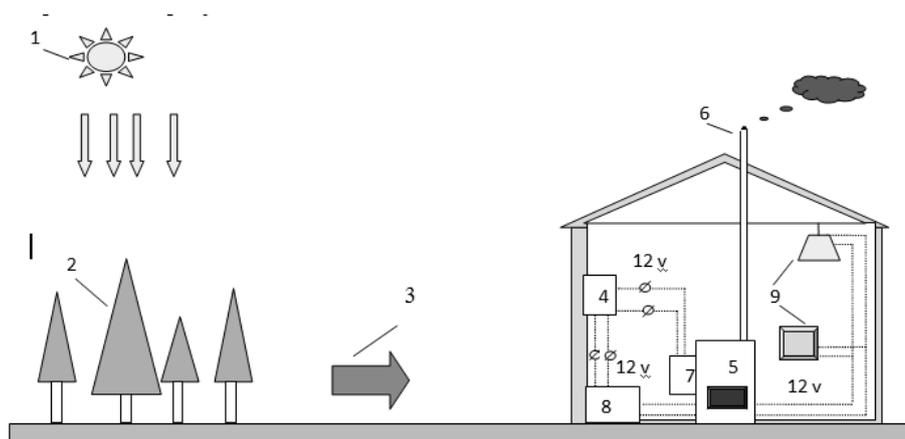


Рис. 1. Термоэлектрическая система энергообеспечения дома.

1-солнце, 2- лесная биомасса, 3-дровяное топливо, 4-контроллер зарядки аккумуляторной батареи, 5- дровяная печь, 6- дымовая труба, 7-термоэлектрический преобразователь, 8- аккумуляторная батарея, 9-потребители электрической энергии.

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 зданиях аналогичного уровня теплозащитенности в более мягких климатических условиях [3].

Объективным количественным 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 HDD (heating degree days), достаточно просто пересчитываемый в принятый в РФ показатель ГСОП. На (рис. 2) приведены сравнительные расчетные значения ГСОП по данным работы [4].

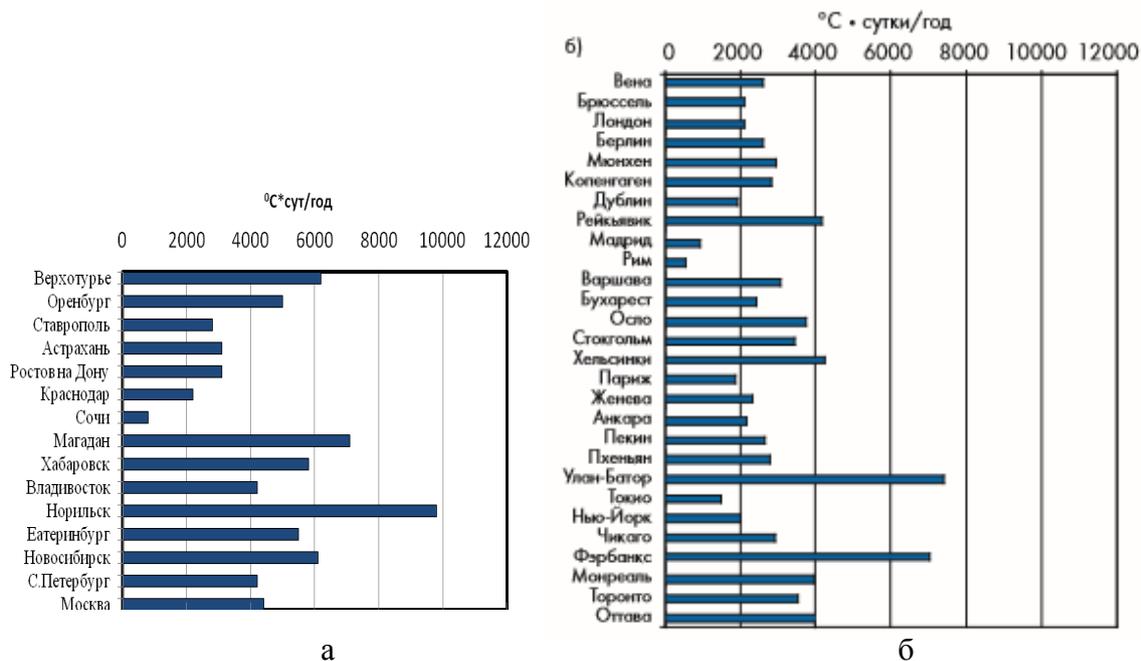


Рис. 2. Значения ГСОП ряда регионов России (а) и зарубежных стран (б) [4].

Приведенные данные показывают, что уровень ГСОП для регионов России существенно (в 1,5-2 раза) выше, чем для всех Европейских стран и США.

Объем тепловой энергии за отопительный период без учета потерь тепла на вентиляцию, канализацию и водоснабжение, инфильтрацию через элементы тепловой защиты в соответствии с принятой в России методикой [5]:

$$Q_{om}^{zod} = 0,024 * ГСОП * V_{от} * k_{об}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}, \quad (1)$$

где ГСОП – градусо-сутки отопительного периода, °С · сут/год:

$$ГСОП = (t_b - t_{от}) z_{от}, \quad (2)$$

$t_{от}$, $z_{от}$ - средняя температура наружного воздуха, °С, и продолжительность отопительного периода, сут/год, принимаемые по своду правил для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более 8 °С.

t_b - расчетная температура внутреннего воздуха здания, °С,

$k_{об}$, Вт/(м³ · °С) - удельная теплозащитная характеристика здания:

$$k_{об} = K_{ком} * K_{общ} \quad (3)$$

$$K_{общ} = 1 / A_n^{cym} * \sum_i (n_{t,i} * A_{ф,i} / R_{о,i}^{pp}) \quad (4)$$

где: $R_{о,i}^{pp}$ - приведенное сопротивление теплопередаче i -го фрагмента теплозащитной оболочки здания, (м² · °С)/Вт;

$A_{ф,i}$ - площадь соответствующего фрагмента теплозащитной оболочки здания, м²;

$V_{от}$ - отапливаемый объем здания, м³;

$n_{t,i}$ - коэффициент, учитывающий отличие внутренней или наружной температуры конструкции от температуры, принятой в расчете ГСОП.

$K_{ком}$ - коэффициент компактности здания:

$$K_{ком} = A_n^{cym} / V_{от}, \text{ м}^{-1} \quad (5)$$

Удельный расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период $q_{от}$:

$$q_{от} = Q_{om}^{zod} / A_{от}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год}) \quad (6)$$

На (рис. 3) приведены значения требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций для ряда регионов России по СНиП 23-02-2003 [5]. Данные значения относятся к новым строениям и направлены на повышение эффективности использования тепловой энергии.

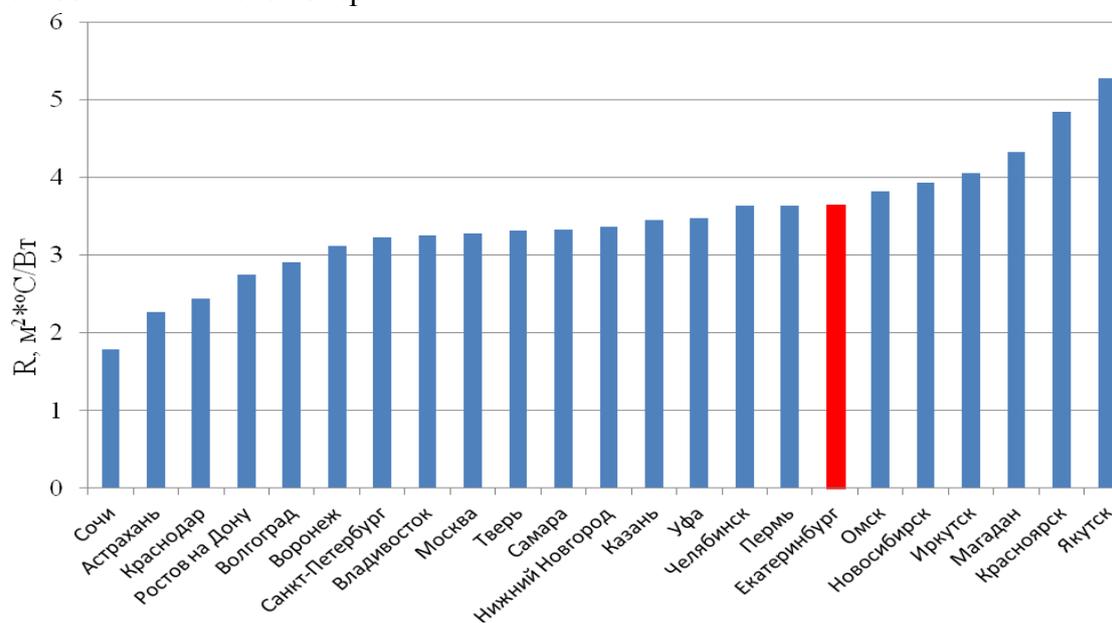


Рис. 3. Значения требуемого сопротивления теплопередаче по [5].

Реально существующие строения, особенно сооруженные в сельской местности методом индивидуального строительства, имеют существенно более низкие значения параметра R в диапазоне от 0,5 до 2 [6]. На (рис. 4) приведены расчетные значения объемов потребления тепловой энергии для отопления одноэтажного сельского дома площадью 40 кв.м. с высотой этажа 2.5м в условиях Уральского региона (ГСОП = 5500 °С · сут/год; $z_{от} = 228$ сут) в зависимости от сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

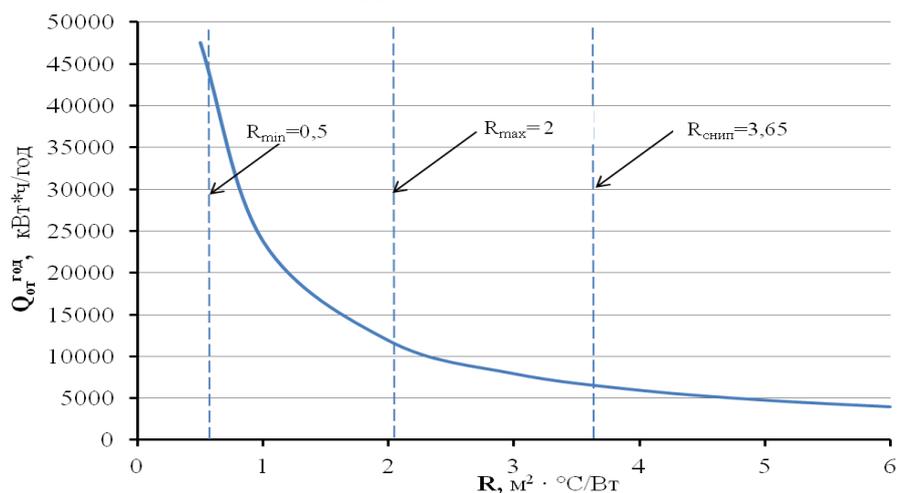


Рис. 4. Зависимость потребления тепловой энергии для отопления сельского дома от сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

Количество потребляемого для отопления дома топлива зависит также от вида топлива и эффективности ($\eta_{печ}$ -КПД) печных устройств. При использовании в качестве энергоносителя сухих дров (влажность 17%) низшая теплота сгорания ($q_{нтс}$) составит

14,76 МДж/кг. При использовании простейшей прямоугольной печи (типа буржуйки) КПД использования топлива составляет не более 70%, при использовании печи «профессор Бутаков» - 85%, колпаковой печи Кузнецова свыше - 90% [7].

Требуемый запас дровяного топлива на отопительный период составит:

$$M = Q_{от}^{zод} / q_{нтс} * \eta_{печ}, \text{ кг} \quad (7)$$

Результаты расчета, для упомянутого выше сельского дома в зависимости от степени теплозащитности (R), приведены в (табл. 1).

Таблица. 1. Годовое потребление печного топлива (кг) для отопления сельского дома.

$\eta_{печ}$, КПД печи, %	$R, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$		
	1	2	3
70	9090	4735	2760
85	7486	3900	2270
90	7070	3683	2150

Среднее значение мощности отопительного устройства:

$$P_{cp} = Q_{от}^{zод} / (24 * z_{от}), \text{ кВт} \quad (8)$$

Годовое изменение температуры окружающего воздуха приводит к изменению потребности в отоплении и мощности отопительных устройств.

На (рис. 5) приведены значения коэффициента ($K_{нер}$) годовой неравномерности теплотребления в условиях Уральского региона по данным [8].

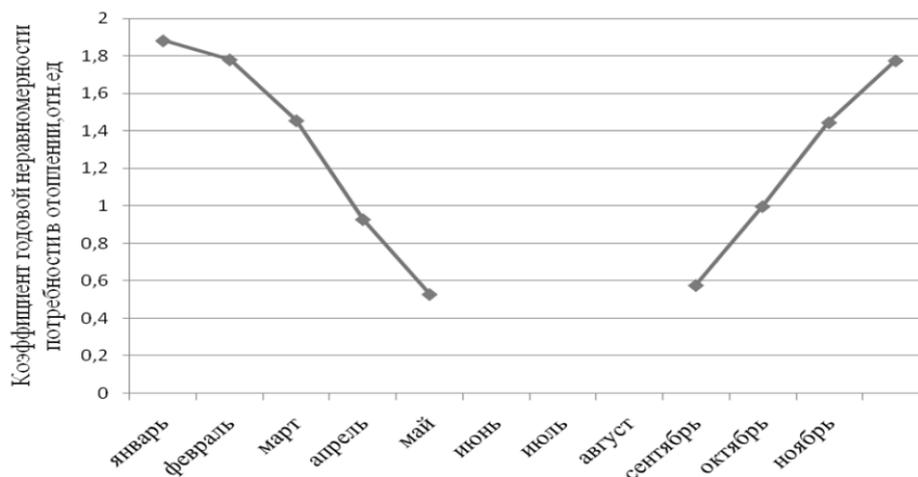


Рис. 5. Коэффициент ($K_{нер}$) неравномерности теплотребления.

С учетом неравномерности теплотребления значения мощности отопительной системы должны быть повышены с целью покрытия пиковых тепловых нагрузок:

$$P_{max} = P_{cp} * K_{нер} = Q_{от}^{zод} * K_{нер} / (24 * z_{от}), \text{ кВт} \quad (9)$$

На (рис. 6) показаны расчетные значения месячного потребления тепловой энергии для дома с достаточно низким уровнем тепловой защищенности ($R=1$).

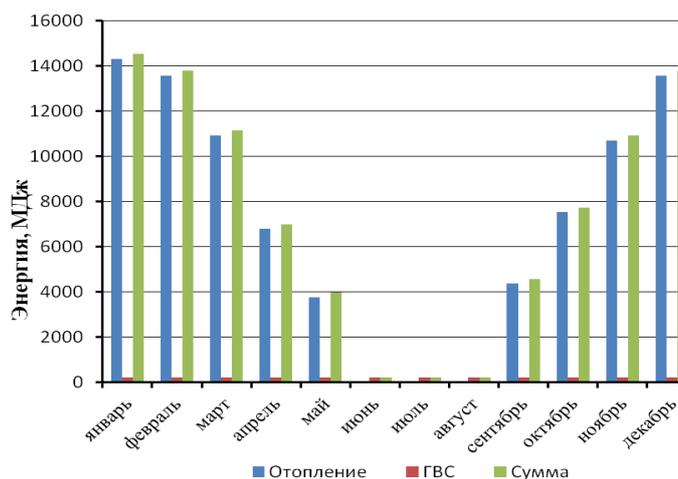


Рис. 6. Расчетные значения месячного потребления тепловой энергии дома.

Анализ графика показывает, что основной вклад в теплотребление сельского дома имеет отопительная нагрузка, существенно изменяющаяся по месяцам отопительного сезона. Максимальные объемы 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).

Анализ минимальной потребности бытовых электропотребителей.

Необходимый суточный объем электрической энергии для сельского дома в условиях обычного бытового уклада (без централизованного отопления, водоснабжения, канализации и кондиционирования) определяется постоянными потребностями в освещении, использовании холодильника, телевидения, компьютера, средств связи, периодической потребностью в стирке.

Потребности в электрической энергии бытовых потребителей с применением современных энергосберегающих приборов и максимального применения приборов постоянного тока приведены в табл. 2.

Таблица 2. Минимальная потребность в энергии бытовых электро- потребителей*.

№	Потребитель	Требуемая характеристика прибора	Удельная мощность	n_i - количество, шт	P_i - требуемая мощность, Вт	Напряжение питания, В	τ_i - время использования, ч/сут	Тип прибора	Суточное потребление, кВт*ч/сут
1	Освещение	400 Лм	100 Лм/Вт	3	12	12	8	Филаментные светодиодные лампы	0,096
2	Телевидение	12 дюйм		1	10	12	6	ROLSEN RCL-1210Z	0,06
3	Нетбук	9 дюйм		1	15	12	3		0,045
4	Холодильник**	48 л	0,15кВт*ч/кг	1	40	12		WAECO Coolmatic CR-50E	0,3
5	Стиральная машина***	4 кг	0,17кВт*ч/кг	1	140	12/220	0,1	Малютка CM-1/M021	0,014
	Итого								0,515

*Паспортные характеристики оборудования по данным производителей.

** На килограмм продуктов.

***На килограмм белья.

Суточное потребление электрической энергии:

$$\mathcal{E}_{\text{сут}} = \int_0^{24} P_i \tau_i \cdot d\tau = \sum_{i=1}^n P_i n_i \tau_i, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (10)$$

где: P_i, n_i, τ_i - мощность, количество и время использования соответствующего прибора.

Для упомянутого выше дома потребление составит 0.515 кВт*ч/сутки или 43 А*ч/сутки

(при использовании АКБ напряжением 12 Вольт).

Оценка возможности производства электрической энергии на отопительной нагрузке дома.

Для указанного дома (40 кв.м., $R = 1$) для климатических условий Уральского региона (ГСОП=5500) ежемесячное потребление тепловой энергии (рис.6) позволит произвести с использованием ТЭГ определенный объем электрической энергии.

Мощность, отдаваемая ТЭГ во внешнюю цепь [9]:

$$P = U * I = (2N * \alpha)^2 * \Delta T^2 * (m/r) * (1 + m)^2, \text{ Вт}, \quad (11)$$

где: α - коэффициент Зеебека (коэффициент термоЭДС), Вт/°К

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 (ТГЭС) оценивается коэффициентом полезного действия:

$$\eta_{\text{ТГЭС}} = (P/Q) * 100, \% \quad (12)$$

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

Современные ТЭГ, основанные на использовании полупроводниковых материалов (например, телурид висмута Bi_2Te_3), обеспечивают преобразование тепловой энергии в рабочем диапазоне температур (< 250 °С) в электрическую с эффективностью ($\eta_{\text{ТЭГ}}$) на уровне 3% [10-16].

На (рис. 7) показаны расчетные значения суточного производства электрической энергии для тепловой нагрузки дома при коэффициентах преобразования $\eta_{\text{ТЭГ}}$ от 0,1 до 2%.

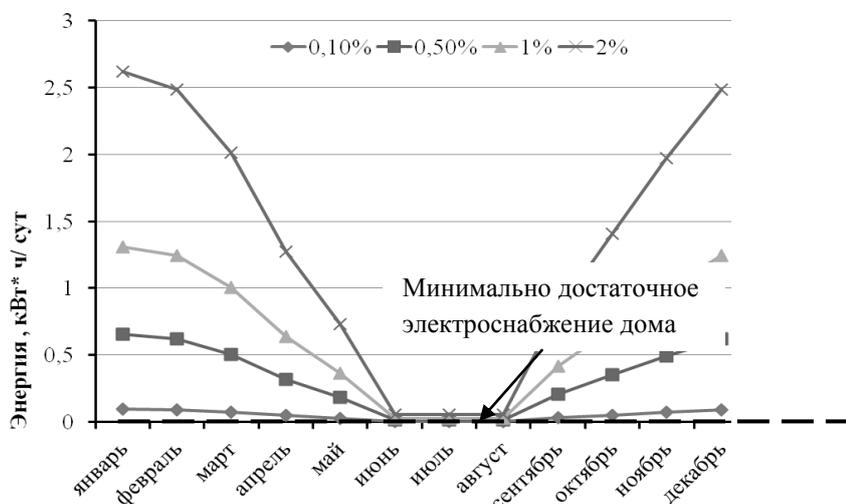


Рис. 7. Расчетные значения суточного производства электрической энергии ТГЭС для отопительной нагрузки дома.

Очевидно, что минимально- достаточный объем производства электрической энергии может быть обеспечен уже при КПД ТЭГС порядка 1%.

Производство электрической энергии ТЭГС в зимние месяцы, характеризующиеся наибольшим потреблением тепловой энергии, имеет наибольшие значения. Приведенные результаты получены при постоянной температуре горячей поверхности ТЭГС.

Однако использования дров в качестве топлива не обеспечивает выполнение этого условия, т.к. процесс горения имеет нерегулярный характер [17]. Как правило, производители ТЭГС указывают мощность при максимальной разности температур, которая имеет место в течение достаточно короткого времени. В реальных условиях мощность, вырабатываемая ТЭГС, значительно снижается при уменьшении разности температур. Важно отметить, также, что подвод в ТЭГС всего объема тепловой энергии от отопительного устройства к ТЭГ технически труднореализуем. Указанные факты приводят к получению существенно более низких значений общего электрического КПД ТЭГС по сравнению с потенциальными возможностями современных термоэлектрических преобразователей [18].

Заключение.

1. Необходимый для полноценной жизнедеятельности объем тепловой энергии в северных климатических условиях достаточно велик и позволяет ставить вопрос о создании когенерационных энергетических установках, 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. 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.

3. Прогресс в области создания мало энергоемкого осветительного оборудования, телевизионной, холодильной и другой бытовой техники и средств связи делает возможным использование современных полупроводниковых термоэлектрических преобразователей для производства необходимого количества электрической энергии в значительной части отопительного периода при достижении полного коэффициента преобразования теплоты в электричество (КПД ТЭГС) более 0,5- 1%.

Литература

1. Безруких П.П., Арбузов Ю.Д. и др. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России.- СПб.: «Наука», 2002.
2. Холмаков А.А., Щеклеин С.Е. Энергетический потенциал биомасс России. Энергетика настоящего и будущего: Сб. матер. I Евроазиатской выставки и конф. 16-18 февраля 2010 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. С. 58-62.
3. Хилл Ф., Гэдди К. Сибирское бремя. Прогнозы советского планирования и будущее России.— М.: Научно образовательный форум по международным отношениям, 2007
4. 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.

5. СП 131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01–99.
6. Башмаков И. А. Энергоэффективность зданий в России и в зарубежных странах // Энергосбережение. 2015. № 3, С. 20-23
7. Пат. 2553748 (РФ). Способ сжигания топлива/ Кузнецов И.В. Действует с (2006.01).
8. Пирогов А.Н., Щеклеин С.Е. Энергетический дизайн - новый концептуальный подход при проектировании и строительстве энергоэффективных и экологичных малоэтажных жилых зданий.// Научно-практ. конф. «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий» ИТФ СО РАН, 19-20 марта 2013. С. 67-72.
9. Шостаковский П. Термоэлектрические источники альтернативного электропитания. // Компоненты и технологии. 2010. № 12.с.131-138.
10. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: справ. пособие. – СПб.: ИПФ «Криотерм», 2004.
11. Montecucco A., Siviter J., Knox A.R. Constant heat characterisation and geometrical optimization of thermoelectric generators// Applied Energy 149 (2015) p. 248–258
12. 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 4(2014) p.85–91
13. Orr B. , Akbarzadeh A. , Mochizuki M., Singh R. Simulation and experimental study on thermal optimization of the heat exchanger for automotive exhaust-based thermoelectric generators// Case Studies in Thermal Engineering 4(2014) p.85–91
14. H. Goldsmid, Bismuth telluride and its alloys as materials for thermoelectric generation, Materials 7 (2014) p.2577–2592.
15. Rowe D, Min G. Evaluation of thermoelectric modules for power generation// J.Power Sources 1998; 73: p.193–193.
16. Chen M, Lund H, Rosendahl La, Condra T.J. Energy efficiency analysis and impact evaluation of the application of thermoelectric power cycle to today's CHP systems// Appl Energy 2010; 87: p. 1231–1238.
17. Champier D, Bedecarrats JP, Kousksou T, Rivaletto M, Strub F, Pignolet P. Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove//Energy 2011; 36: p.1518–1526.
18. Никитин А.Д., Щеклеин С.Е., Немихин Ю.Е., Муродов У.Ш., Холов Н.Б. Экспериментальное исследование характеристик отопительно-варочной термоэлектрической печи// Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» 2016 № 19-20 с.29-40.