

УДК 621.311.2:338.3(571.56)

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ЯКУТИИ

^{1,2}Иванова И.Ю., ³Ноговицын Д.Д., ³Шейна З.М., ³Сергеева Л.П., ²Халгаева Н.А.

¹Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, e-mail: nord@isem.irk.ru;

²ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН),
Иркутск, e-mail: khalgaeva@isem.irk.ru;

³ФГБУН ФИЦ ЯНЦ СО РАН Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
СО РАН (ИФТПС СО РАН), Республика Саха (Якутия), Якутск, e-mail: dmitry.nogovitzyn@yandex.ru

В статье рассмотрена экономическая эффективность использования гелиоэнергетических установок для тепло- и электроснабжения в условиях арктической территории восточных регионов РФ на примере поселка Чокурдах. Поселок расположен в арктической зоне Республики Саха (Якутия) в зоне децентрализованного электроснабжения. Оценка эффективности использования солнечного излучения для энергоснабжения потребителей поселка проведена по показателям среднегодового прихода солнечной радиации для метеостанции о. Мостах (бух. Тикси), расположенной в тех же широтах, что и п. Чокурдах. Фотоэлектрическая станция и система солнечного теплоснабжения рассмотрены в качестве дополнительного источника энергии к дизельной электростанции и котельной. Исследование выполнено для неподвижных гелиоустановок, ориентированных на юг и закрепленных под углом широты местности п. Чокурдах. Для оценки производительности установок справочные данные солнечной радиации пересчитаны на наклонную поверхность. Расчеты возможной выработки электрической и тепловой энергии установками производились для трех значений КПД: для фотоэлектрических преобразователей – $\eta = 10, 15$ и 20% , для солнечных коллекторов – $\eta = 50, 54$ и 60% . Для выбора оптимальной мощности фотоэлектрической станции и системы солнечного теплоснабжения выполнены исследования по совмещению графика потребления и выработки электрической и тепловой энергии с последовательным увеличением мощности с целью максимального полезного использования энергии. По результатам проведенных исследований сделан вывод о приоритетности в современных ценовых условиях использования солнечной энергии на цели электроснабжения в арктической зоне восточных регионов РФ по сравнению с теплоснабжением. Расчетный срок окупаемости строительства фотоэлектрической станции оценивается в 11–23 года, системы солнечного теплоснабжения – в 40–60 лет, что объясняется природными условиями, капиталоемкостью оборудования и соотношением цен на вытесняемые дизельное топливо и сырую нефть.

Ключевые слова: солнечное излучение, природные условия Арктики, система солнечного теплоснабжения, фотоэлектрическая станция, оценка эффективности, вытесненное топливо, срок окупаемости

COST-EFFECTIVENESS ANALYSIS OF SOLAR RADIATION USAGE FOR ENERGY SUPPLY IN THE ARCTIC ZONE OF YAKUTIA: THE CASE OF CHOKURDAKH SETTLEMENT

^{1,2}Ivanova I.Yu., ³Nogovitsyn D.D., ³Sheina Z.M., ³Sergeeva L.P., ²Khalgaeva N.A.

¹Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, e-mail: nord@isem.irk.ru;

²Melentev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS),
Irkutsk, e-mail: khalgaeva@isem.irk.ru;

³The FBFI Larionov V.P. Institute of Physical and Technical problems of the North, Siberian Department
of the Russian Academy of Science (IPTPN SB RAS), Yakutsk, e-mail: dmitry.nogovitzyn@yandex.ru

The article considers the economic efficiency of using solar power plants for heat and electricity supply in the Arctic territory of the Eastern regions of the Russian Federation on the example of the Chokurdakh settlement. The settlement is located in the Arctic zone of the Sakha Republic (Yakutia) in the zone of decentralized electricity supply. The efficiency assessment of using solar radiation for power supply to consumers of the settlement was carried out according to the indicators of the long-term annual average arrival of solar radiation for the weather station on the Isle of Mostakh (Tiksi Bay) located in the same latitudes as Chokurdakh settlement. A photovoltaic power station and a solar heat supply system are considered as an additional source of energy to a diesel power plant and boiler house. The study was performed for fixed solar installations oriented to the South and fixed at an angle with the latitudes of Chokurdakh. To assess the stations capacity, reference solar radiation data is recalculated on an inclined surface. Calculations of the possible generation of electric and thermal energy by installations were made for three efficiency factor values: for photovoltaic converters – $\eta = 10, 15$ and 20% , for solar collectors – $\eta = 50, 54$ and 60% . To select the optimal capacity of a photovoltaic plant and a solar heat supply system, studies were performed on combining the schedule of consumption and generation of electric and thermal energy with a sequential increase in power in order to maximize the effective use of energy. Based on the results of the research, it was concluded that the use of solar energy for power supply in the Arctic zone of the Eastern regions of the Russian Federation is a priority under modern price conditions in comparison with heat supply. The estimated payback period for the construction of a photovoltaic power station is estimated at 11 to 23 years, of solar heating – in 40-60 years, due to natural conditions, capital intensity of equipment and price ratio for the displaced diesel fuel and crude oil.

Keywords: solar radiation, natural environment of the Arctic, solar heat supply system, photovoltaic power station, efficiency assessment, displaced fuel, payback time

Потенциал солнечной энергии на территории России по данным работы [1] оценивается в 12,5 млн т условного топлива в год. Перспективы использования энергетического потенциала солнечного излучения на территории России рассмотрены во многих работах [2–4]. Результаты оценки ресурсов солнечной энергии Арктической зоны Российской Федерации представлены в статье [5].

Прогноз развития возобновляемой энергетики потребителей децентрализованной зоны приведен в работе [6]. При этом заслуживает внимания изучение альтернативных вариантов автономного энергоснабжения [7]. Системы солнечного теплоснабжения могут быть рекомендованы для повышения комфортности проживания на удаленных стоянках оленеводов, рыбаков, старателей, туристов, сенокосцев, сельскохозяйственных ферм, коневодческих бригад и т.д. [8].

Целесообразность внедрения необходимости использования солнечной энергии для автономного электро- и теплоснабжения потребителей и развитии распределенной энергетики с применением возобновляемых источников энергии рассмотрены также в работах [9–11].

Гелиоэнергетические ресурсы конкретной территории зависят от ее географических и климатических характеристик [12].

Основной целью данной работы является исследование экономической эффективности и целесообразности использования гелиоэнергетических установок для тепло- и электроснабжения п. Чокурдах Аллаиховского улуса Республики Саха (Якутии). В настоящее время жители поселка обеспечиваются электроэнергией от дизельной электростанции мощностью 7,8 МВт, тепловой энергией – от шести котельных суммарной мощностью около 32 Гкал/ч. В качестве топлива в котельных используется сырая нефть.

Материалы и методы исследования

Основой для проведения исследований послужили методические рекомендации по оценке экономической эффективности применения возобновляемых источников энергии в зоне децентрализованного электроснабжения [13].

Природные условия п. Чокурдах. Территория характеризуется повсеместным распространением сплошных многолетнемерзлых пород, лишь в некоторых местах нарушенной весьма ограниченными

по площади таликами. В арктической части наибольшая мощность мерзлоты по данным [14] составляет 1500 м. На остальной территории она достигает 700–1000 м.

Радиационный баланс, давление воздуха. В арктической зоне существуют большие различия в продолжительности солнечного освещения в зимний и летний периоды. В связи с этим ведущим климатообразующим фактором являются радиационные процессы.

Летом облачность намного снижает приток прямой солнечной радиации. Но в то же время сильно возрастает рассеянная радиация, в результате суммарный приток радиации увеличивается.

Температура воздуха. С распределением давления и ветров тесно связаны закономерности и в распределении температуры воздуха в течение года. Для низинных пространств побережья, где сказывается умеряющее воздействие обширных акваторий, характерны более высокие зимние и низкие летние температуры, чем в континентальных областях. На прибрежных станциях средние месячные температуры июля и августа, как и зимних месяцев, незначительно отличаются друг от друга.

Анализ распределения средних месячных температур самого теплого и самого холодного месяцев показывает, что для низменных равнин севера и невысокого плоскогорья характерен плавный их ход. Средние январские температуры воздуха исследуемой территории не выходят за пределы -32 – -36 °С. Средние температуры июля сравнительно высоки и достигают 8 – 12 °С. Положительные температуры чаще всего устанавливаются в середине первой декады июня, причем заморозки наблюдаются до конца этого месяца. Продолжительность периода со средней суточной температурой выше 0 °С в районе п. Чокурдах составляет 75 дней [15].

Влажность, осадки. За изменением температуры следует годовой ход абсолютной влажности воздуха, которая зимой в Северной Якутии не превышает 1 Мб. [15]. Среднемесячные величины несколько возрастают летом и уменьшаются зимой, что обусловлено обилием влаги в тундре в теплое время года. Большая часть годовой суммы осадков выпадает летом.

Ветер. В холодный период на большей части территории господствуют южные, летом северо-восточные ветры.

Оценка показателей гелиопотенциала. Оценка эффективности использования

солнечного излучения для энергоснабжения потребителей п. Чокурдах проведена по показателям прихода солнечной радиации на метеостанции о. Мостах (бух. Тикси), вследствие ее расположения в тех же широтах и нахождения за Полярным кругом.

Наличие полярных дня и ночи обуславливает крайне неравномерные поступления солнечного тепла в течение года. Для более эффективного использования гелиопотенциала на территориях, расположенных в высоких широтах, приемники размещают наклонно под углом, равным широте местности, с возможностью сезонной корректировки наклона. Однако при значительных площадях принимающих поверхностей их сезонная корректировка практически сложно реализуема, в отличие от небольших поверхностей для мелких потребителей (индивидуальных домов, метеостанций и т.п.).

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки производительности гелиоустановок для условий п. Чокурдах из приводимых в справочниках данных солнечной радиации на горизонтальную и перпендикулярную поверхности проведен пересчет этой величины на наклонную поверхность.

На рис. 1 представлено изменение в течение года солнечной радиации, падающей

на горизонтальную, перпендикулярную и наклонную к солнцу поверхности для п. Чокурдах.

Продолжительность солнечного сияния составляет 1616 ч/год, годовой приход радиации на горизонтальную поверхность – 315 кВт·ч/м², за счет использования наклонной поверхности гелиоприемников его значение увеличивается до 596 кВт·ч/м².

Снижение солнечной радиации в июне по сравнению с другими летними месяцами объясняется атмосферными особенностями сезона и местности.

Расчет возможной выработки тепловой и электрической энергии гелиоустановками. В расчетах приняты неподвижные установки, закрепленные под углом широты местности и ориентированные на юг.

Выработка тепловой энергии солнечным коллектором (Гкал/м²) и электрической энергии фотоэлектрическим преобразователем (кВт·ч/м²) определяется по формуле

$$W = \eta \cdot S_{\text{накл}}$$

где η – коэффициент полезного действия гелиоустановки (для солнечного коллектора (СК) составляет 50–60%, для фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) – 10–20% в зависимости от технико-экономических показателей различных фирм-изготовителей).

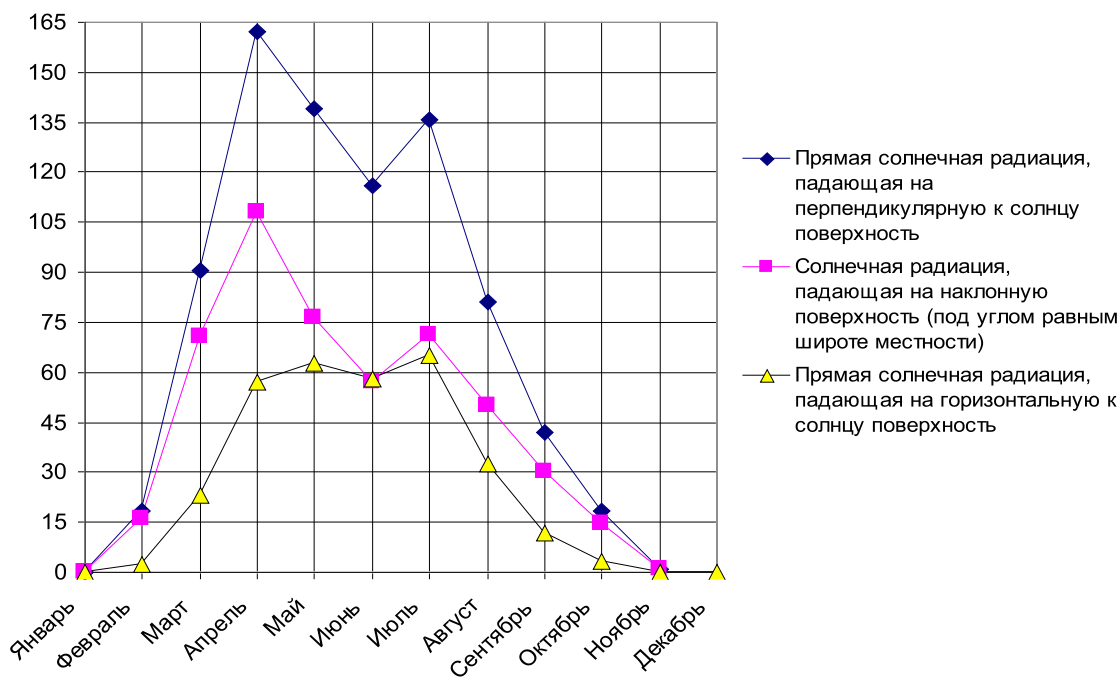


Рис. 1. Приход солнечной радиации в п. Чокурдах в течение года

Расчеты выработки производились для трех значений η – минимального, максимального и среднего: для СК $\eta = 50, 54$ и 60% , для ФЭП – $\eta = 10, 15$ и 20% .

На рис. 2 и 3 представлена выработка тепловой энергии СК и электрической энергии ФЭП по месяцам в течение года при различных КПД.

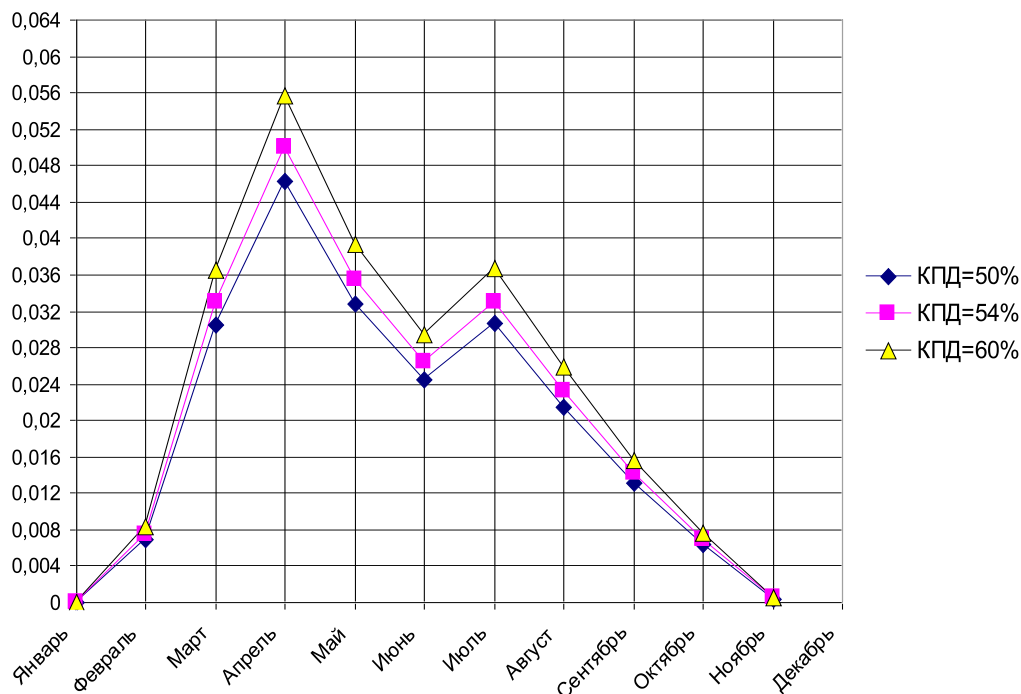


Рис. 2. Выработка тепловой энергии 1 м^2 солнечного коллектора в течение года для условий п. Чокурдах, $\text{Гкал}/\text{м}^2$ в месяц

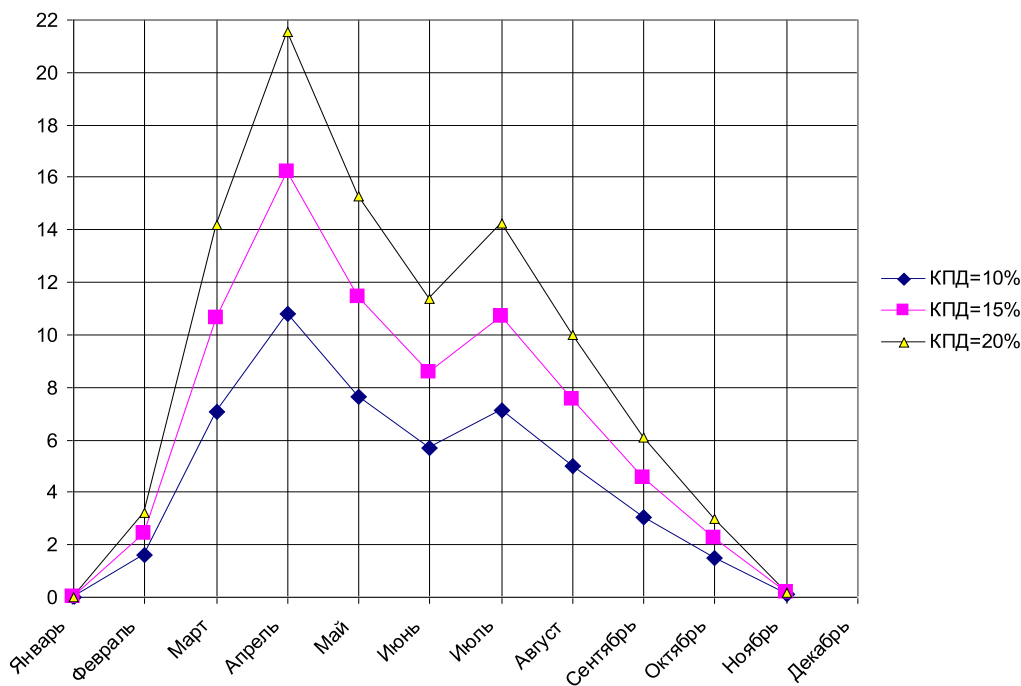


Рис. 3. Выработка электроэнергии 1 м^2 фотоэлектрического преобразователя в течение года для условий п. Чокурдах, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в месяц

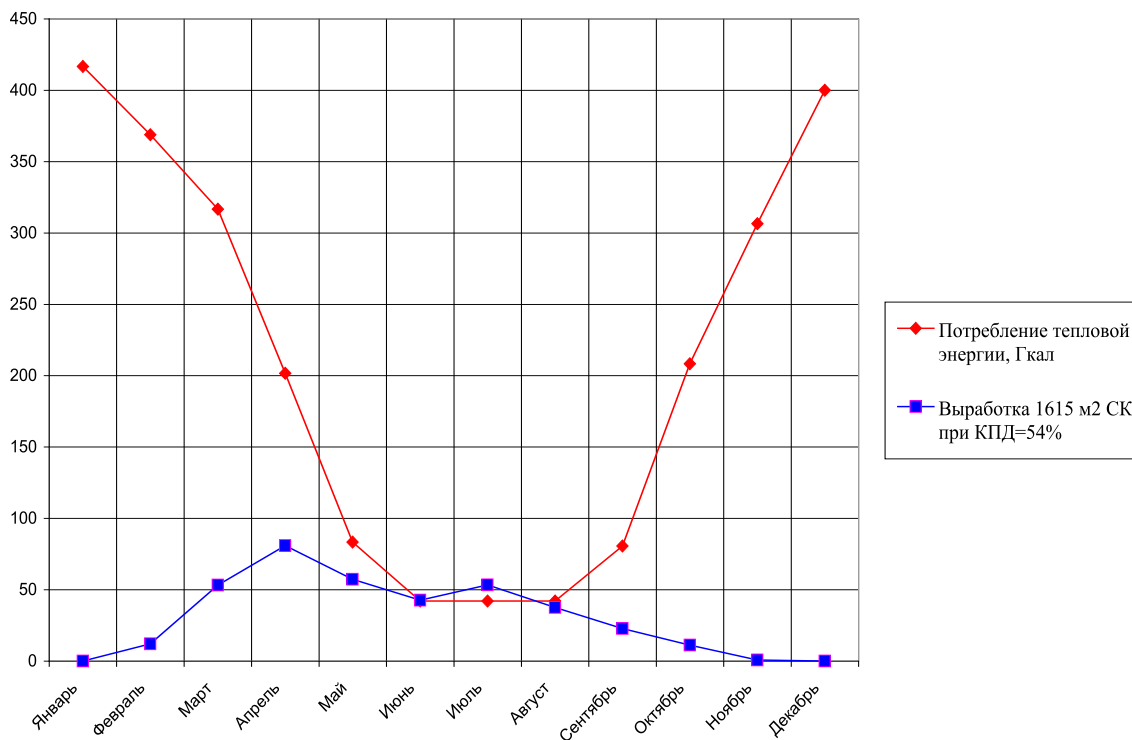


Рис. 4. Совмещение графиков потребления и выработки тепловой энергии ССТ (1615 м²)

Крайне высокая неравномерность проявления гелиопотенциала в течение года влияет на эффективность его использования, так как максимальное потребление тепловой и электрической энергии наблюдается именно в зимний период, когда показатели гелиопотенциала минимальны.

Оценка экономической эффективности применения системы солнечного теплоснабжения и фотоэлектрической станции. Для оценки эффективности использования солнечной энергии на цели энергоснабжения в условиях п. Чокурдах в расчетах приняты следующие исходные данные:

- ранее определенные по справочным данным и рассчитанные для наклонной поверхности гелиоприемников показатели потенциала солнечной энергии;

- расчетная выработка энергии солнечным коллектором и фотоэлектрическим преобразователем при средних значениях КПД – 54 и 15% соответственно;

- график отпуска тепловой энергии от котельной № 5 п. Чокурдах;

- график потребления электроэнергии от ДЭС п. Чокурдах;

- стоимостные показатели гелиоэнергетических установок;

- цены на дизельное топливо и сырую нефть в п. Чокурдах в 2020 г.

Система солнечного теплоснабжения. В исследовании рассмотрено обеспечение от системы солнечного теплоснабжения (ССТ) только потребности горячего водоснабжения присоединенной нагрузки от котельной № 5. Расчеты проведены для двух вариантов: одноконтурной системы для использования в безморозный период на основе плоских солнечных коллекторов и двухконтурной для круглогодичного использования на основе вакуумных коллекторов. Потребность в тепловой энергии на цели горячего водоснабжения от котельной № 5 оценивается порядка 42 Гкал/месяц. На рис. 4 представлено совмещение графиков потребления и выработка тепловой энергии системой солнечного теплоснабжения, состоящей из СК расчетной площадью 1615 м², полученной исходя из максимально полезного использования выработки тепловой энергии.

В течение трех летних месяцев (июнь – август) на цели горячего водоснабжения потребуется 126 Гкал. Для выработки этого количества энергии на котельной при удельном расходе топлива 170 кг у.т./Гкал

(по данным ГУП ЖКХ Республики Саха (Якутия) необходимо израсходовать 15 т сырой нефти. Полезный отпуск тепловой энергии от двухконтурной системы в течение года составит 365 Гкал. Простой срок окупаемости системы солнечного теплоснабжения за счет объема вытесненного топлива зависит от стоимости оборудования и составляет 40–60 лет (табл. 1).

Фотоэлектрическая станция. Для оценки экономической эффективности строительства фотоэлектрической станции (ФЭС) выполнено совмещение графиков потребления и возможной выработки электроэнергии ФЭП. Расчетная площадь гелиоприемников, исходя из максимально полезного использования выработки ФЭП при КПД = 15%, со-

ставляет 30 тыс. м² (рис. 5). Суммарная мощность такой станции – 4,6 МВт.

Оценка эффективности проведена для двух вариантов компоновки электростанции: с аккумуляторными батареями (АБ) и без таковых. Полезный отпуск электроэнергии от ФЭС оценивается в 2 млн кВт·ч, при удельном расходе топлива 380 г у.т./кВт·ч (по данным Сахаэнерго) на ДЭС объем вытесненного дизельного топлива составит 525 т. Простой срок окупаемости фотоэлектрической станции с аккумулярованием энергии более чем в 2 раза превосходит этот показатель в варианте без аккумулярования и составляет 22,8 лет, что обусловлено более высокой стоимостью оборудования (табл. 2).

Таблица 1

Технико-экономические характеристики системы солнечного теплоснабжения

Показатель	Одноконтурная	Двухконтурная
Удельные капиталовложения, тыс. руб./кВт	25	50
Стоимость ССТ, млн руб.	28,3	56,5
Объем вытесненного топлива, т	15,0	43,4
Стоимость вытесненного топлива, тыс. руб.	479,3	1388,5
Простой срок окупаемости, лет	59,0	40,7

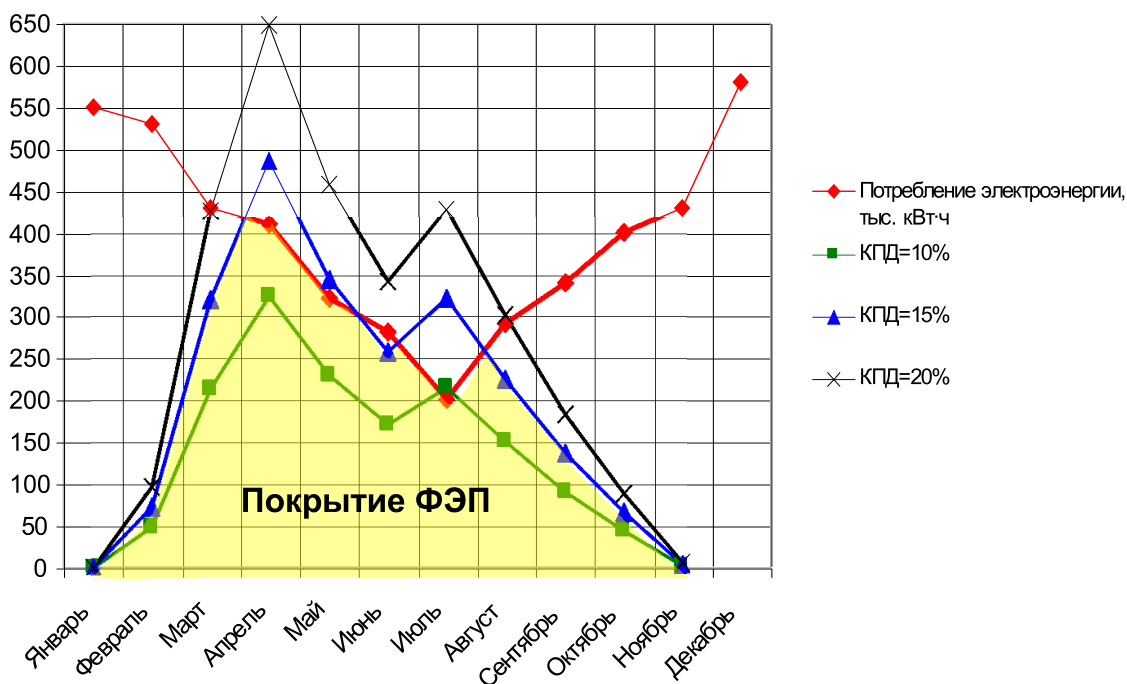


Рис. 5. Совмещение графиков потребления и выработка электроэнергии ФЭП (30 тыс. м²)

Таблица 2

Технико-экономические показатели фотоэлектрической станции

Показатель	без АБ	с АБ
Удельные капиталовложения, тыс. руб./кВт	76	160
Стоимость ФЭС, млн руб.	349,7	736,2
Объем вытесненного топлива, т	525,4	525,4*
Стоимость вытесненного топлива, млн руб.	32,3	32,3
Простой срок окупаемости, лет	10,8	22,8

Примечание. * – без учета улучшения режима работы ДЭС.

Выводы

Результаты проведенных на примере п. Чокурдах Аллаиховского улуса Республики Саха (Якутии) исследований позволяют сделать вывод о приоритетности в современных ценовых условиях использования солнечной энергии на цели электроснабжения в арктической зоне восточных регионов РФ по сравнению с теплоснабжением. Расчетный срок окупаемости строительства фотоэлектрической станции оценивается в 11–23 года, системы солнечного теплоснабжения – в 40–60 лет, что объясняется природными условиями, капиталоемкостью оборудования и соотношением цен на дизельное топливо и сырую нефть.

Исследование выполнено в рамках проектов госзадания XI.174.2.3 (рег. № АААА-А17-117030310439-8), XI.174.2.4 (рег. № АААА-А17-117052210035-2) фундаментальных исследований СО РАН и по материалам подготовки Схемы и программы развития электроэнергетики Республики Саха (Якутии) на 2020–2024 гг.

Список литературы / References

1. Рудобашта С.П. Теплотехника. М.: Колос С, 2010. 600 с.
2. Rudobashta S.P. Teplotekhnika. M.: Kolos S, 2010. 600 p. (in Russian).
3. Безруких П.П. Возобновляемая энергетика: сегодня – реальность, завтра – необходимость. М.: Лесная страна, 2007. 120 с.
4. Bezrukikh P.P. Renewable energy: today's reality, tomorrow's necessity. M.: Lesnaya Strana, 2007. 120 p. (in Russian).
5. Муравлева Е.А. Оценка потенциала использования энергии солнечного излучения на территории России // Вестник аграрной науки Дона. 2015. № 1. С. 38–45.
6. Muravleva E.A. Assessment of the potential use of solar radiation energy on the territory of Russia // Vestnik agrarnoy nauki Dona. 2015. № 1. P. 38–45 (in Russian).
7. Бычков И.А., Черкасова Т.А., Манакова Е.А., Гайбов И.А. Анализ эффективности съема энергии солнца в системе солнечный коллектор – солнечная панель // Молодой ученый. 2016. № 28–2. С. 84–86.
8. Bychkov I.A., Cherkasova T.A., Manakova E.A., Gai-bov I.A. Analysis of the efficiency of solar energy removal in the solar collector – solar panel system // Molodoy uchenyy. 2016. № 28–2. P. 84–86 (in Russian).

5. Попель О.С., Киселева С.В., Моргунова М.О., Габдрахманова Т.С., Тарасенко А.Б. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в Арктической зоне Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2015. № 1 (17). С. 64–69.

6. Popel O.S., Kiseleva S.V., Morgunova M.O., Gabderakhmanova T.S., Tarasenko A.B. Renewable Energy for Power Supply in the Arctic Zone of the Russian Federation // Arctic: Ecology and Economics. 2015. № 1 (17). P. 64–69 (in Russian).

6. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Развитие возобновляемой энергетики на востоке России в первой половине XXI века на фоне общероссийских тенденций // Энергетическая политика. 2016. № 3. С. 66–73.

6. Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F. The development of renewable energy in the east of Russia in the first half of the 21st century against the backdrop of all-Russian trends // Energy Policy. 2016. № 3. P. 66–73 (in Russian).

7. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Проблемы энергетики восточной зоны Российской Арктики и возможные пути решения // Энергетическая политика. 2018. № 4. С. 80–88.

7. Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F. Energy problems of the eastern zone of the Russian Arctic and possible solutions // Energy Policy. 2018. № 4. P. 80–88 (in Russian).

8. Муравлева Е.А., Рудобашта С.П. Эффективность использования солнечного излучения для горячего водоснабжения фермерского дома // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2013. № 2 (58). С. 16–18.

8. Muravleva E.A., Rudobashta S.P. Efficiency of using solar radiation for hot water supply of a farm house // Vestnik FGOU VPO MGAU. 2013. № 2 (58). P. 16–18 (in Russian).

9. Руденко М.Ф., Третьяк Л.П., Гривина В.В., Шипулина Ю.В. Моделирование экологической эффективности внедрения геотермоэнергетических комплексов для производства теплоты // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 2. С. 73–80.

9. Rudenko M.F., Tretyak L.P., Grivina V.V., Shipulina Yu.V. Modeling of ecological efficiency of introduction of solar energy complexes for heat production // Vestnik AGTU. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2016. № 2. P. 73–80 (in Russian).

10. Яковлева Э.В. Исследование параметров солнечного излучения для оценки эффективности применения фотоэлектрических элементов в составе электротехнического комплекса для электроснабжения автономных потребителей // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 5–1. [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/34960> (дата обращения: 25.07.2020).

10. Yakovleva E.V. Investigation of solar radiation parameters for evaluating the effectiveness of photovoltaic elements in the electrical complex for power supply of Autonomous consumers // Modern scientific research and innovation. 2014. № 5–1. [Electronic resource]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/34960> (date accesse: 25.07.2020) (in Russian).

11. Фортвов В.Е., Попель О.С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13. DOI: 10.1134/S0040363614060022.

Fortov V.E., Popel O.S. The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*. 2014. V. 61. № 6. P. 389–398. DOI: 10.1134/S0040601514060020.

12. Ушаков В.Я. Возобновляемая и альтернативная энергетика: ресурсосбережение и защита окружающей среды. Томск: Изд. «СибГрафик», 2011. 138 с.

Ushakov V.Ya. Renewable and alternative energy: resource conservation and environmental protection. Tomsk: Izd. «Sib-Grafik», 2011. 138 p. (in Russian).

13. Методы и модели разработки региональных энергетических программ / Отв. ред. Б.Г. Санеев. Новосибирск: Наука, 2003. 136 с.

Methods and models for developing regional energy programs / Ed. by B.G. Saneev. Novosibirsk: Nauka, 2003. 136 p. (in Russian).

14. Якутия / Отв. ред. С.С. Коржуев. М.: Изд. «Наука», 1965. 461 с.

Yakutia / Ed. by S.S. Korzhuev. M.: Izd. «Nauka», 1965. 461 p. (in Russian).

15. Справочник по климату СССР. Облачность. Влажность. Атмосферные явления. Вып. 24. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 275 с.

Reference guide to the climate of the USSR. Cloud Cover. Humidity. Atmospheric phenomenon. Vol. 24. L.: Hydrometeoizdat, 1966. 397 p. (in Russian).