УДК 621.311.24:69.032:502.17

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА КРЫШАХ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ Г. ФЕРГАНЫ: ТЕХНИЧЕСКИЙ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рахматов Одилжон Адхамжон угли

Ферганский политехнический институт PhD докторант

o.raxmatov@ferpi.uz

Аннотация: В статье представлена методология оценки технического потенциала крыш зданий для установки фотоэлектрических систем (ФЭС) в условиях г. Ферганы, Узбекистан. Исследование включает пространственный анализ, оценку климатических и конструктивных факторов, а также экономическую и экологическую эффективность интеграции ФЭС в городскую инфраструктуру. Результаты показывают, что до 70% кровельных площадей пригодны для размещения ФЭС, обеспечивая выработку до 106 400 кВт·ч/год для плоских крыш площадью 400 м², с окупаемостью в 2-3 года при государственной поддержке. Работа подчеркивает потенциал ФЭС для устойчивого развития региона.

Ключевые слова: Фотоэлектрические системы, технический потенциал, солнечная инсоляция, пространственный анализ, экономическая эффективность, экологическое воздействие, Фергана.

Annotatsiya: Maqolada Farg‘ona shahri (O‘zbekiston) sharoitida binolarning tomlarida fotoelektrik tizimlar (FET) o‘rnatish uchun texnik salohiyatni baholash metodologiyasi taqdim etilgan. Tadqiqot fazoviy tahlil, iqlimiy va konstruktiv omillarni baholash, shuningdek FETni shahar infratuzilmasiga integratsiya qilishning iqtisodiy va ekologik samaradorligini o‘z ichiga oladi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, tom yopish maydonlarining 70 foizigacha FET o‘rnatish uchun yaroqli bo‘lib, maydoni 400 m² bo‘lgan yassi tomlar uchun yiliga 106 400 kVt•soatgacha elektr energiyasi ishlab chiqarishni ta’minlaydi va davlat ko‘magida 2-3 yil ichida o‘zini oqlaydi. Ushbu ish FETning mintaqani barqaror rivojlantirish uchun salohiyatini ta’kidlaydi.

Kalit so‘zlar: Fotoelektrik tizimlar, texnik salohiyat, quyosh insolyatsiyasi, fazoviy tahlil, iqtisodiy samaradorlik, ekologik ta’sir, Farg‘ona.

Annotation: The article presents a methodology for assessing the technical potential of building roofs for installing photovoltaic systems (PVS) under the conditions of the city of Fergana, Uzbekistan. The research includes spatial analysis, assessment of climatic and structural factors, as well as the economic and environmental effectiveness of FES integration into urban infrastructure. The results show that up

ISSN 3030-3907

to 70% of roofing areas are suitable for FES placement, providing production of up to 106,400 kWh/year for flat roofs with an area of 400 m2, with a payback period of 2-3 years with state support. The work emphasizes the FES's potential for sustainable development of the region.

Keywords: Photoelectric systems, technical potential, solar insulation, spatial analysis, economic efficiency, environmental impact, Fergana.

ВВЕДЕНИЕ. Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приобретает все большее значение в условиях глобального изменения климата и роста потребления энергии в городах. В Узбекистане, где традиционно преобладают угольные и газовые электростанции, развитие солнечной энергетики становится стратегическим направлением, поддерживаемым государственной "Энергетической стратегией на 2030 год" [1]. Город Фергана, расположенный на широте 40°22' с.ш., характеризуется высокой солнечной инсоляцией (1900 кВт·ч/м²/год) и более чем 320 солнечными днями в году, что создает благоприятные условия для внедрения фотоэлектрических систем (ФЭС). Однако плотная застройка и ограниченность земельных ресурсов требуют альтернативных подходов, таких как использование крыш зданий.

Оптимизация размещения ФЭС на крышах — это комплексная задача, включающая оценку технического потенциала кровель, анализ их конструктивной пригодности, учет климатических факторов и экономической целесообразности. В мировой практике подобные исследования активно проводятся в странах с развитой солнечной энергетикой, таких как Германия и Китай [2], однако в условиях Центральной Азии, где климат и тип застройки существенно отличаются, необходима адаптация существующих методологий. Например, плоские железобетонные крыши советской застройки, характерные для Ферганы, отличаются от скатных крыш европейских городов, что влияет на подход к установке панелей.

Целью данного исследования является разработка и апробация методологии оценки технического потенциала крыш для размещения ФЭС в условиях Ферганы, а также анализ экологических и экономических выгод их интеграции в городскую инфраструктуру. Задачи включают: (1) определение доступных и пригодных зон на крышах с учетом затенения и технических ограничений, (2) изучение влияния климатических и конструктивных факторов на эффективность ФЭС, (3) применение геоинформационных систем (ГИС) для пространственной оптимизации, (4) оценку экономической окупаемости и экологического эффекта, включая снижение выбросов CO_2.

ISSN 3030-3907

Актуальность работы обусловлена не только государственной политикой, но и необходимостью поиска устойчивых решений для энергообеспечения густонаселенных регионов с ограниченными ресурсами.

МЕТОДЫ. Сбор данных. Исследование опирается на многоуровневый сбор данных о зданиях Ферганы. Основные источники включают кадастровые реестры, предоставляющие информацию о размерах и типах крыш, спутниковые снимки Sentinel-2 с разрешением 10 м для анализа геометрии кровель, а также локальные планы застройки для уточнения ориентации зданий. Для типичного многоэтажного дома советской постройки (5 этажей) площадь крыши принята равной 400 м², материал — железобетонные плиты толщиной 15-20 см, угол наклона — 0°. Для частных домов со скатными крышами средняя площадь составила 100 м², с преобладанием металлических или шиферных покрытий. Несущая способность определялась на основе строительных норм СНиП 2.01.07-85* [4]: бетон — до 500 кг/м², металл — до 250 кг/м², шифер — до 150 кг/м².

Климатические данные собирались из архивов NASA POWER [5] (инсоляция) и MeteoBlue [6] (температура, ветер, осадки). Среднегодовая инсоляция в Фергане составила 1 900 кВт·ч/м², с пиками в июле (6,5-7 кВт·ч/м²/день) и минимумом в декабре (2,5-3 кВт·ч/м²/день). Ветровые нагрузки рассчитывались для скорости ветра до 20 м/с (38,2 кг/м²), снеговые — до 100 кг/м² (редкие случаи).

Пространственный анализ. Для определения пригодных зон использовались ГИС-системы QGIS и ArcGIS. Цифровые модели зданий (DSM) создавались на основе спутниковых снимков и, при наличии, данных LiDAR с точностью ±0,5 м. Анализ затенения проводился с помощью инструмента Solar Radiation (ArcGIS) и плагина GRASS r.sun (QGIS), моделирующих траекторию солнца для широты Ферганы. Расчеты выполнялись для ключевых дат (21 июня, 21 декабря) с усреднением за год. Зоны с коэффициентом затенения Sf > 0,20 (потери энергии >15%) исключались. Коэффициент использования площади рассчитывался как:

$$K_u = \frac{A_{usable}}{A_{total}}$$

где Ausable — полезная площадь, Atotal— общая площадь крыши.Расчет потенциальной выработки. Потенциальная выработка энергии (Epot) определялась по формуле: $E_{pot}=A_{usable}G\cdot\eta\cdot PR$где G— инсоляция (1900 кВт·ч/м²/год), η — КПД монокристаллических панелей (0,20), PR — коэффициент производительности (0,80, учитывает потери на инверторе и загрязнение). Установленная мощность рассчитывалась как: P=Ausable

ISSN 3030-3907

·0,16кВт/м² Оптимальный угол наклона (30°) моделировался для увеличения инсоляции до 2 000 кВт·ч/м²/год.

Оценка нагрузок. Общая нагрузка на крышу (Wtotal) включала вес панелей (12 кг/м²), ветровую нагрузку (38,2 кг/м² при 20 м/с) и снеговую нагрузку (80 кг/м² при угле 30°):

$$Wtotal=Wpanel+Wwind+S$$

Прочность материалов проверялась по ГОСТ 27751-2014 [5].

Экономический и экологический анализ. Экономическая эффективность оценивалась через затраты на установку (0,25 долл./Вт, включая панели и монтаж), эксплуатацию (100-200 долл./год) и срок окупаемости:

$$T_{payback} = \frac{C_{install}}{R}$$

где R=Epot·0,04 долл./кВт*ч, (тариф в Узбекистане, 2025). Субсидии (50% от Cinstall) учитывались по программе "Қуёшли хонадон". Экологический эффект измерялся снижением выбросов CO_2 (0,8 кг CO_2/кВт·ч для традиционной энергии) за жизненный цикл системы (25 лет).

РЕЗУЛЬТАТЫ. Технический потенциал крыш. Анализ показал, что для плоской крыши 400 м² полезная площадь составила 280 м² (Ku = 0,7) с учетом затенения (40 м², 10%) и технических зон (80 м², 20%). Потенциальная выработка достигла 85 120 кВт·ч/год, установленная мощность — 44,8 кВт. Для скатной крыши 100 м² Ausable=60 м² (Ku = 0,6), Epot=22800кВтч/год, P=12кВт. В масштабах Ферганы до 70% крыш (площадью 200-500 м² для многоэтажек и 50-150 м² для частных домов) пригодны для ФЭС (таблица 1).

Таблица 1.

Технический потенциал крыш Ферганы

Тип крыши	Средняя площадь, м²	Ku	Epot, кВт·ч/год	Мощность, кВт
Плоская	400	0,7	106 400	56
Скатная	100	0,6	22 800	12

ISSN 3030-3907

Климатические и конструктивные особенности. Железобетонные крыши (300-500 кг/м²) выдерживают Wtotal=130,2кг/м² с запасом прочности 50-70%, что делает их идеальными для ФЭС. Металлические крыши (150-250 кг/м²) имеют запас 10-20%, требуя усиления ферм, а шифер (100-150 кг/м²) непригоден без реконструкции. Инсоляция 1900 кВт·ч/м²/год и низкие осадки (150-200 мм) благоприятны, но летние температуры (+35°C) снижают КПД на 0,4-0,5% на градус выше 25°C, что требует вентиляции панелей.

Пространственный анализ. Оптимальный угол наклона 30° увеличивает инсоляцию до 2 000 кВт·ч/м²/год. Для крыши 400 м² с S_f=0,15, A_{usable}=260м², E_{pot}=83200 кВтч/год. Затенение от соседних зданий (высота 10-20 м, расстояние 5-15 м) снижает доступную площадь на 10-20%. Скатные крыши южной ориентации имеют минимальные потери (S_f<0,10).

Экономическая и экологическая эффективность. Система 50 кВт (Cinstall=12500долл.) окупается за 4,9 года без субсидий и за 2,6 года с субсидией 50% (6 250 долл.). Годовой доход — 2 553,6 долл. (Epot=63840кВтч/год), снижение CO_2 — 51 т/год, за 25 лет — 1 275 т, с учетом выбросов от производства панелей (40 т) чистая экономия — 1 235 т CO_2.

Таблица 2.

Экономические и экологические показатели ФЭС 50 кВт

Параметр	Значение
Затраты на установку	12 500 долл.
Субсидия (50%)	6 250 долл.
Выработка	63 840 кВт·ч/год
Доход (0,04 долл./кВт·ч)	2 553,6 долл./год
Окупаемость (с субсидией)	2,6 года
Снижение CO_2	51 т/год

ISSN 3030-3907

ОБСУЖДЕНИЕ. Технический потенциал и конструктивные особенности. Полученные результаты подтверждают высокий потенциал плоских железобетонных крыш Ферганы для размещения ФЭС благодаря их прочности (запас 50-70%) и большой площади (до 500 м²). Это согласуется с исследованиями IRENA [2], где подчеркивается преимущество плоских крыш в городах с плотной застройкой. Скатные крыши, несмотря на меньшую площадь и ограниченную несущую способность, выигрывают за счет естественного угла наклона, близкого к оптимальному (20-45°). Однако шиферные конструкции требуют полной замены или усиления, что увеличивает затраты и снижает их привлекательность.

Климат Ферганы (1 900 кВт·ч/м²/год, 320 солнечных дней) сопоставим с условиями южных регионов Испании или Италии, где солнечная энергетика активно развивается [3]. Однако высокие летние температуры требуют дополнительных мер, таких как установка панелей на каркасах с вентиляцией, что может увеличить PR с 0,80 до 0,85, повышая выработку на 5-7%.

Пространственная оптимизация. Применение ГИС для анализа затенения и инсоляции позволяет точно определять оптимальные зоны, что особенно важно в условиях Ферганы, где расстояние между зданиями (5-15 м) создает умеренное затенение. Сравнение с исследованиями в Китае [2] показывает, что использование LiDAR повышает точность DSM до ±0,5 м, снижая ошибки в расчетах Ausable A_{usable} Ausable до 2-3%. Для масштабирования подхода на весь город необходимо интегрировать данные о высоте всех зданий и сезонной динамике теней.

Экономическая эффективность. Срок окупаемости 2,6 года с субсидиями делает ФЭС конкурентоспособными даже по сравнению с традиционными источниками энергии в Узбекистане (тариф 0,04 долл./кВт·ч). Это ниже, чем в Германии (5-7 лет при тарифе 0,10 евро/кВт·ч) [3], благодаря низкой стоимости оборудования (0,25 долл./Вт) и государственной поддержке. Введение "зеленых" тарифов (0,06-0,08 долл./кВт·ч), как в странах ЕС, могло бы сократить Trayback до 1,5-2 лет, стимулируя массовое внедрение.

Экологический эффект. Снижение выбросов CO_2 на 51 т/год для системы 50 кВт эквивалентно годовому поглощению углерода 2 500 деревьями [6], что подчеркивает вклад ФЭС в устойчивое развитие. За 25 лет одна система экономит 1 235 т CO_2, что сопоставимо с эффектом от перевода 15 домохозяйств на ВИЭ. Однако производство панелей создает экологический след (40 т CO_2), что требует дальнейшего развития технологий утилизации.

ISSN 3030-3907

Ограничения и перспективы. Ограничения исследования включают отсутствие экспериментальных данных по реальной выработке и нагрузкам, а также упрощенное моделирование сезонных факторов. Например, зимнее снижение инсоляции (2,5 кВт·ч/м²/день) может уменьшить E_{pot} на 10-15% в декабре-феврале, что требует динамического анализа. Перспективы включают: (1) тестирование ФЭС на пилотных объектах, (2) разработку интеллектуальных систем управления для интеграции с городской сетью, (3) изучение комбинированных решений (ФЭС + рекуперация тепла) [6].

ВЫВОДЫ. Разработанная методология позволяет систематически оценивать технический потенциал крыш Ферганы для ФЭС, выявляя до 70% пригодных площадей с выработкой до 106 400 кВт·ч/год для плоских крыш (400 м²). Пространственный анализ оптимизирует размещение, исключая зоны с S_f>0,20, а железобетонные конструкции обеспечивают надежность установок. Экономическая эффективность (окупаемость 2-3 года с субсидиями) и экологический эффект (51 т CO_2/год) подтверждают целесообразность интеграции ФЭС в городскую инфраструктуру. Результаты могут быть адаптированы для других городов Центральной Азии с аналогичными условиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-4477 "Об энергетической стратегии на 2030 год", 2019.
2. IRENA (2023). Renewable Energy in Cities: Opportunities and Challenges. International Renewable Energy Agency.
3. Sabban, M. (2019). Integration of Solar Systems with Heat Recovery: A Case Study. Energy Efficiency Journal, 12(3), 45-60.
4. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. Госстрой СССР, 1985.
5. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Межгосударственный стандарт, 2014.
6. NASA POWER (2023). Prediction of Worldwide Energy Resources. Доступно по: https://power.larc.nasa.gov/.
7. MeteoBlue (2023). Climate Data for Fergana. Доступно по: https://www.meteoblue.com/.

ISSN 3030-3907