УДК 662.997

Ю.К. РАШИДОВ, д.т.н., профессор, Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных технических квалификаций Ташкент

Б.У. ИСАКОВ, старший преподаватель, Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных технических квалификаций

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ УЗБЕКИСТАНА И ПОТЕНЦИАЛ АРГОНОВОГО ЗАПОЛНЕНИЯ МЕЖСТЕКОЛЬНОЙ ПРОСЛОЙКИ

CLIMATIC LIMITATIONS ON THE EFFICIENCY OF FLAT-PLATE SOLAR COLLECTORS IN UZBEKISTAN AND THE POTENTIAL OF FILLING THE INTER-PANE SPACE WITH ARGON

Аннотация

Плоские солнечные коллекторы широко рассматриваются как средство горячего водоснабжения и отопления в Узбекистане, где высок приход солнечной радиации. Однако резко континентальный климат (жаркое лето, холодная зима с заметными суточными и сезонными перепадами температуры, запылённость воздуха) ограничивает их эффективность. Основная часть тепловых потерь коллектора приходится на верхние потери через светопрозрачное покрытие, особенно при низких температурах наружного воздуха. В работе анализируются климатические факторы, влияющие на тепловой КПД плоских коллекторов в условиях Узбекистана, и оценивается потенциал замены воздуха аргоном в межстекольной прослойке двухслойного остекления. Аргон имеет более низкую теплопроводность, чем воздух, что снижает кондуктивно-конвективный теплообмен в прослойке. Методика основана на тепловом балансе коллектора. Результаты показывают, что по расчетным данным, аргон в сочетании с low-e покрытием снижает a_{60} на 36–39 % ценой уменьшения η_0 на 0,021–0,040. Сделан вывод, что аргоновое заполнение целесообразно прежде всего в районах и сезонах с низкими температурами наружного воздуха, а его экономическая эффективность требует отдельной оценки с учётом герметичности и долговечности остекления.

Ключевые слова: плоский солнечный коллектор, Узбекистан, климатические условия, тепловой КПД, двойное остекление, аргон, тепловые потери.

Abstract

Flat-plate solar collectors are widely considered for domestic hot water and space heating in Uzbekistan, a country with high solar irradiation. However, the sharply continental climate (hot summers, cold winters, large daily and seasonal temperature swings, and dust loading) limits their performance. Top heat losses through the transparent cover account for a major share of collector losses, especially at low ambient temperatures. This study analyzes the climatic factors affecting the thermal efficiency of flat-plate collectors under Uzbekistan's conditions and assesses the potential of replacing air with argon in the gap of double glazing. Argon has a lower thermal conductivity than air, which reduces conductive and convective heat transfer across the gap. The methodology is based on the thermal balance of the collector. The results indicate that, according to calculated data, argon combined with a low-e coating reduces a60 by 36–39%, at the cost of a 0.021–0.040 decrease in η_0. The study concludes that argon filling is most justified in regions and seasons with low ambient temperatures, while its economic feasibility requires a separate assessment that accounts for gas-tightness and glazing durability.

Keywords: flat-plate solar collector, Uzbekistan, climatic conditions, thermal efficiency, double glazing, argon, heat losses.

Плоские солнечные коллекторы служат основой гелиосистем горячего водоснабжения и отопления, но в условиях резко континентального климата их эффективность определяется сезонными перепадами температуры, инсоляции и запылённости. По оценкам Международного энергетического агентства, выполненным по данным Global Solar Atlas, медианная глобальная горизонтальная радиация по Узбекистану составляет 4,52 кВт·ч/(м²·сут) при диапазоне 4,0–5,0, а прямая нормальная радиация – 4,44 кВт·ч/(м²·сут) [1]. В пересчёте на год это 4,52 · 365 ≈ 1650 кВт·ч/м²; значения модельные, а не измеренные. Цель работы – по опубликованным данным выделить климатические факторы, ограничивающие эффективность коллектора, и оценить потенциал заполнения межстекольной прослойки аргоном. Собственные экспериментальные результаты автора в статью не включены.

Тепловой баланс и климатические факторы

Полезная тепловая мощность 1 м² коллектора определяется балансом поглощённой энергии и тепловых потерь:

$$q_{\text{пол}} = I \cdot \tau_{\text{сп}} \cdot \alpha_{\text{абс}} - U_L \cdot (T_{\text{абс}} - T_{\text{нар}}) \quad (1)$$

где $q_{пол}$ – полезная тепловая мощность, Вт/м²; I – плотность потока излучения на поверхности коллектора, Вт/м²; $\tau_{сп}$ – коэффициент светопропускания остекления; $\alpha_{абс}$ – коэффициент поглощения абсорбера; U_L – интегральный коэффициент тепловых потерь, Вт/(м²·К); $T_{абс}$, $T_{нар}$ – температуры абсорбера и наружного воздуха, К. Инсоляция задаёт величину I, температура воздуха – разность $T_{абс} - T_{нар}$, ветер через теплоотдачу с внешнего стекла влияет на U_L, а запылённость снижает $\tau_{сп}$.

По станции Ташкент (индекс 38457) средняя температура изменяется от 2,3 °C в январе до 28,3 °C в июле, то есть амплитуда составляет 28,3 − 2,3 = 26,0 °C; абсолютный минимум равен −28,0 °C (1900 г.), абсолютный максимум +44,6 °C (1997 г.) [2]. В декабре–феврале ясных дней по общей облачности 5 + 3 + 3 = 11, пасмурных 15 + 13 + 15 = 43 из 90 суток (43/90 ≈ 48 %, рисунок 1); в июне–августе ясных дней 13 + 18 + 21 = 52, пасмурных 2 + 1 + 1 = 4 [2]. Ясных дней летом в 52/11 ≈ 4,7 раза больше. Период осреднения источник не указывает [2].

Следовательно, зимой малый приход излучения совпадает с большой разностью температур. Для условного режима с температурой абсорбера +60 °C и воздуха −20 °C разность составляет 333 − 253 = 80 К, что вдвое больше, чем при 40 К; при том же U_L потери вдвое выше. Летом, напротив, приход излучения максимален, а осадки практически отсутствуют: по нормам 1961–1990 гг. на июнь–сентябрь в Ташкенте приходится 7 + 4 + 2 + 5 = 18 мм из 420 мм (сумма помесячных норм), или 18/420 ≈ 4,3 % [3]. Запылённое стекло в этот период естественным путём не очищается.

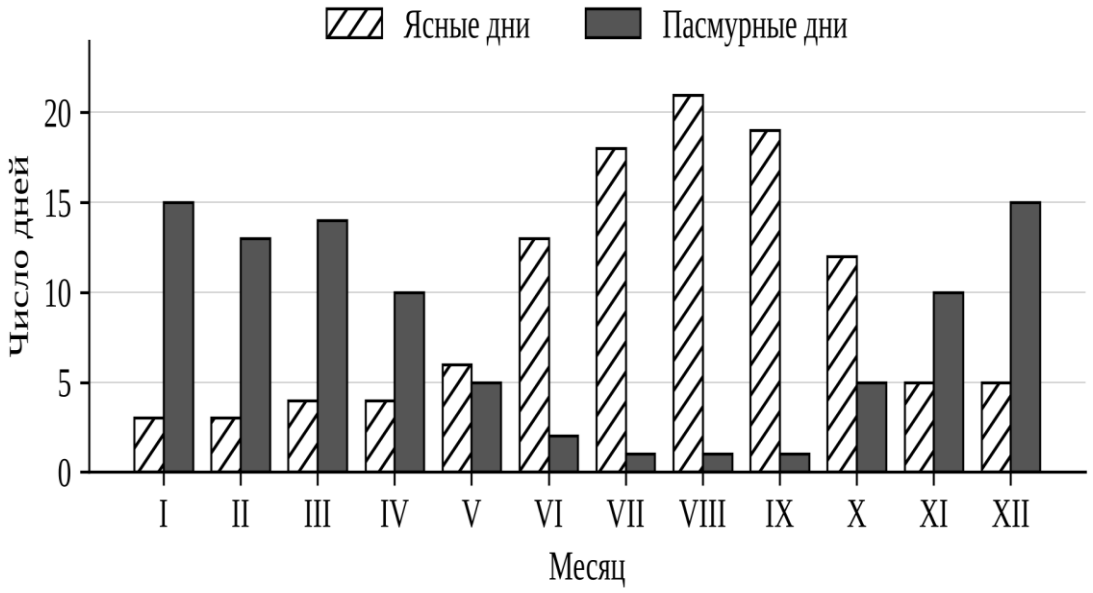

Рисунок 1 – Число ясных и пасмурных дней по месяцам, станция Ташкент (по данным [2])

По данным 57 станций Узгидромета за 2010–2023 гг., в Бухарской области отмечается более 30 дней в году с песчано-пылевыми бурями, в Навоийской – более 15, на станции Бухара – около 25 [4]. Измерений зависимости $\tau_{сп}$ от плотности пылевого слоя для Узбекистана в рассмотренных работах не найдено. В аналогичном засушливом климате (Дахран) 5 г/м² пыли за 45 суток снизили пропускание стекла под углом 26° на 20 % [5]; результат получен для покровного стекла фотоэлектрических модулей и на коллекторы Узбекистана прямо не переносится.

Заполнение прослойки аргоном: опубликованные данные

Теплопроводность при 300 К составляет 0,0262 Вт/(м·К) для воздуха и 0,0179 Вт/(м·К) для аргона [6]. Отношение 17,9/26,2 = 0,683, то есть аргон проводит тепло на 31,7 % хуже воздуха. Расчётная модель Вестлунда и соавторов для герметичной полости между абсорбером и стеклом показала снижение полных потерь коллектора до 20 % при замене воздуха инертным газом [7].

Экспериментально эффект исследован в Институте исследований солнечной энергии Хамельна (ISFH): коллектор имеет герметичный двухстекольный пакет, нижнее стекло с низкоэмиссионным (low-e) покрытием, прослойка между стёклами заполнена аргоном. Результаты испытаний по EN 12975-2 приведены в таблице 1 [8]. Эффективный коэффициент потерь при разности температур 60 К

$$a_{60} = a_1 + 60 \cdot a_2 \qquad (2)$$

где a_1, a_2 – линейный и квадратичный коэффициенты тепловых потерь по EN 12975-2, Вт/(м²·К) и Вт/(м²·К²).

Таблица 1 – Характеристики коллектора ISFH (по [8])

Показатель	**Стандартный коллектор с одним стеклом**	**Прототип с аргоновым пакетом и low-e**
η_0	0,820	0,780–0,799
a_1, Вт/(м²·К)	3,52	2,14–2,25
a_2, Вт/(м²·К²)	0,0167	0,0101–0,0110
a_{60}, Вт/(м²·К)	4,52	2,75–2,91

Расчёт по формуле (2): 3,52 + 60 · 0,0167 = 4,52; 2,14 + 60 · 0,0101 = 2,75; 2,25 + 60 · 0,0110 = 2,91. Коэффициент a_{60} снизился на 1 − 2,91/4,52 = 0,356 и 1 − 2,75/4,52 = 0,392, то есть на 36–39 %. При ΔT = 60 К потери q = a_{60} · ΔT составляют 4,52 · 60 ≈ 271 Вт/м² у стандартного коллектора и 165–175 Вт/м² у прототипа. Оптическая плата за второе стекло: η_0 ниже на 0,021–

0,040. Эффект получен для сочетания аргона и low-e покрытия, вклад одного аргона из этих данных не выделяется.

Криптон проводит тепло хуже аргона, но по оценке авторов [8] его стоимость в 100 раз выше, поэтому для практического применения предпочтителен аргон. Герметичность проверена циклами при температуре кромочного соединения 140 °C в течение 1200 ч для пакетов 1850 × 1230 мм: концентрация аргона снизилась менее чем на 7 процентных пунктов, влияние на годовую выработку – менее 1 % [8]. Снижение потерь повышает температуру стагнации: 264 °C против 210 °C у стандартного коллектора при 1000 Вт/м² и 30 °C наружного воздуха [8]; авторы рекомендуют 80 мм минеральной ваты вместо обычных 40–50 мм. Расчёты годовой выработки в [8] выполнены для климата Цюриха, Барселоны и Брауншвейга; для условий Узбекистана в рассмотренных работах таких расчётов не найдено.

Выводы и постановка задач

Климат расчётных пунктов требует двух разных решений: зимой – снижения U_L при малой инсоляции и разности температур до 80 К, летом – защиты от стагнации и запыления при максимальном приходе излучения и отсутствии осадков. По расчетным данным, аргон в сочетании с low-e покрытием снижает a_{60} на 36–39 % ценой уменьшения η_0 на 0,021–0,040.

Остаются нерешёнными: эффект аргона без low-e покрытия; значение U_L для конструкции с двумя стёклами по 4 мм, герметичной аргоновой прослойкой 16 мм, негерметичным воздушным зазором 20 мм и тыльной изоляцией 50 мм в климате Ташкента, Бухары и Навои; зависимость $\tau_{сп}$ от плотности пыли; сезонная схема соединения коллекторов. Эти задачи решаются в диссертационном исследовании автора.

Список литературы

1. Solar Energy Policy in Uzbekistan: A Roadmap. – International Energy Agency. – URL: https://www.iea.org/reports/solar-energy-policy-in-uzbekistan-a-roadmap/context-of-renewable-energy-in-uzbekistan (дата обращения: 28.10.2026).

2. Погода и климат. Климат Ташкента (станция 38457). – URL: http://www.pogodaiklimat.ru/climate/38457.htm (дата обращения: 28.10.2026).

3. Метеоинфо (Гидрометцентр России). Климатические нормы: Ташкент. – URL: https://meteoinfo.ru/categ-articles/43-climate-cat/klimaticheskie-normy/worldcitiesclim/2408-tashkent (дата обращения: 28.10.2026).

4. Rakhmatova N., Nishonov B.E., Shardakova L. et al. Temporal and Spatial Dynamics of Dust Storms in Uzbekistan from Meteorological Station Records (2010–2023) // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16, No. 7. – Art. 782. – DOI: 10.3390/atmos16070782.

5. Said S.A.M., Walwil H.M. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance // Solar Energy. – 2014. – Vol. 107. – P. 328–337. – DOI: 10.1016/j.solener.2014.05.048.

6. Engineers Edge. Thermal Conductivity of Gases Chart. – URL: https://engineersedge.com/heat_transfer/thermal-conductivity-gases.htm (дата обращения: 28.10.2026).

7. Vestlund J., Rönnelid M., Dalenbäck J.-O. Thermal performance of gas-filled flat plate solar collectors // Solar Energy. – 2009. – Vol. 83, No. 6. – P. 896–904. – DOI: 10.1016/j.solener.2008.12.005.

8. Föste S., Giovannetti F., Ehrmann N., Rockendorf G. Performance and reliability of a high efficiency flat plate collector – final results on prototypes // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 48. – P. 48–57. – DOI: 10.1016/j.egypro.2014.02.007.

Сведения об авторах

Ю.К. РАШИДОВ, д.т.н., профессор, Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных технических квалификаций Ташкент

Б.У. ИСАКОВ, старший преподаватель, Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных технических квалификаций