Поступила в редакцию *07.10.2024*

УДК 620.92: 677.057 DOI: 10.37816/2713-0789-2024-4-4(14)-65-81

Сравнительный анализ теплотехнической эффективности солнечных коллекторов с абсорберами из различных материалов

Н. М. Шарпар[*,1], Л. И. Жмакин[*], К. А. Маркова[*], И. Н. Власов[*]

[*]Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

Аннотация

В статье представлен сравнительный анализ теплотехнической эффективности различных абсорберов солнечных коллекторов. Рассмотрены ключевые параметры, такие как коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент потерь и теплотехнические характеристики, которые определяют эффективность преобразования солнечной энергии в теплоту. В ходе исследования были проведены лабораторные эксперименты с текстильным абсорбером солнечного коллектора трубчатого типа, а также сравнительные испытания с полимерным и металлическими аналогами. Результаты показали, что текстильный абсорбер солнечного коллектора уступает металлическим в плане теплотехнической эффективности, но превосходит полимерную систему, что делает его конкурентоспособным в условиях переменной солнечной радиации и низких температур. Текстильный абсорбер солнечного коллектора также обладает преимуществами в виде меньшей массы, гибкости конструкции и устойчивости к внешним воздействиям, что способствует их дешевизне и простоте установки. Однако, несмотря на незначительное снижение КПД по сравнению с металлическими аналогами, текстильный абсорбер может быть выгодным решением для использования в определённых климатических условиях.

Ключевые слова

Текстильный материал, КПД, экспериментальные исследования, абсорбер, солнечное излучение, теплообмен, альтернативные материалы.

Введение

В последние десятилетия солнечная энергетика стала одной из наиболее перспективных и активно развивающихся отраслей альтернативной энергетики. С увеличением интереса к использованию возобновляемых источников энергии [1–3] солнечные коллекторы стали занимать важное место в системах отопления и горячего водоснабжения [4], обеспечивая устойчивое и экологически чистое решение для потребностей домохозяйств и промышленных объектов. При этом солнечные коллекторы различаются по

[1] *Для переписки:*
Email: sharpar753@mail.ru

материалам [5–7], конструкции и принципам работы, что в свою очередь оказывает значительное влияние на их эффективность и экономическую целесообразность использования.

Одной из характеристик, определяющих эффективность солнечных коллекторов, является их теплотехническая эффективность, которая определяется через КПД, температурные потери и способность преобразовывать солнечное излучение в тепловую энергию. В настоящее время на рынке представлено несколько типов солнечных коллекторов, среди которых можно выделить системы с металлическими и полимерными абсорберами. Металлические традиционно считаются наиболее эффективными, однако полимерные представляют собой интересную альтернативу, обещающую снижение стоимости производства и установки систем, а также улучшение их эксплуатационных характеристик.

Солнечные коллекторы с текстильными абсорберами представляют собой относительно новый класс солнечных систем. Текстильный материал используется здесь в качестве абсорбера для преобразования солнечной энергии в теплоту [8]. Эти системы имеют ряд преимуществ, таких как лёгкость конструкции, гибкость и устойчивость к воздействию внешней среды, что делает их привлекательными для применения в условиях, где традиционные металлические абсорберы солнечных коллекторов могут быть менее экономически выгодными или слишком сложными в установке и обслуживании. Однако, несмотря на очевидные преимущества, текстильные абсорберы имеют и ряд недостатков, связанных с их теплотехнической эффективностью и более низкой теплоотдачей по сравнению с металлическими системами.

С другой стороны, металлические абсорберы обладают высокими теплотехническими характеристиками, обеспечивая более быстрый и эффективный перенос теплоты от абсорбера к теплоносителю [9]. Однако их производство и установка могут быть более затратными, а также они подвержены коррозии, что снижает их долговечность и требует дополнительных затрат на обслуживание. При этом металлические коллекторы всё ещё остаются наиболее популярным выбором в солнечной энергетике благодаря своей высокой эффективности и проверенной надежности.

Сравнительный анализ теплотехнической эффективности текстильного и металлических абсорберов солнечных коллекторов позволяет выявить сильные и слабые стороны обеих технологий и предложить рекомендации по выбору наиболее подходящих решений для различных климатических и эксплуатационных условий. В рамках данного исследования были проведены лабораторные испытания, в ходе которых сравнивались различные типы абсорберов, включая текстильный с трубчатым абсорбером и металлический образцы. В результате анализа были получены данные о КПД, коэффициенте потерь и других ключевых параметрах, которые позволяют более точно оценить преимущества и недостатки каждой из технологий.

Особое внимание в исследовании было уделено методам измерения теплотехнической эффективности, а также использованию различных методов обработки данных для получения достоверных результатов [10]. В частности, для измерения температуры теплоносителя использовались термопары, а для оценки солнечной радиации применялся пиранометр. Результаты экспериментов позволили выявить, что текстильный абсорбер солнечного коллектора может быть вполне

конкурентоспособным в условиях переменной солнечной активности и низких температур, при этом он обладает более низкой стоимостью и легче в установке, чем металлические аналоги.

Также важно отметить, что полимерный абсорбер солнечного коллектора хотя и имеет высокую стойкость к внешним воздействиям, уступает металлическому и текстильному в теплотехнической эффективности, что делает его менее привлекательным для использования в солнечных установках, требующих высокой производительности. Тем не менее полимерные материалы продолжают использоваться в качестве основы для солнечных коллекторов в некоторых специфических областях, таких как применение в условиях высокой влажности или агрессивных химических средах.

Материалы и методы решения задачи

Преобразование солнечной энергии в теплоту является ключевой задачей, которую решают как текстильные, так и металлические абсорберы солнечных коллекторов. Оценка эффективности таких устройств [8] требует проведения множества экспериментальных исследований, целью которых является выявление влияния различных факторов на теплотехнические характеристики данных устройств. Одним из важнейших аспектов этих исследований является точность измерения температурных режимов и потока теплоносителя в системе абсорбера. В данном контексте особое внимание уделяется измерению температуры теплоносителя, так как именно это значение определяет КПД солнечного коллектора.

В рамках проведённых исследований использовалось специализированное оборудование для измерения температурных показателей, что позволило оценить эффективность теплообмена в абсорберах солнечных коллекторов. Важным элементом экспериментальной установки являлась система с циркуляцией теплоносителя, который пропускался через абсорбер солнечного коллектора [10]. Сигналы, поступающие от термопар, являлись основным источником данных о температуре, и их обработка производилась с использованием промышленных ПИД-регуляторов типа ТРМ 202 производства компании «Овен» [11]. Этот регулятор был оснащён двумя каналами, что позволило одновременно контролировать несколько точек измерения температуры в различных частях системы.

Сигналы от термопар поступали в ПИД-регулятор, который в свою очередь направлял данные на контроллер марки АС-4, также произведённый компанией «Овен» [11]. Полученные данные регистрировались на компьютере, что позволяло не только следить за изменениями температуры в реальном времени, но и собирать информацию для дальнейшего анализа и обработки. Такая автоматизированная система регистрации данных [12] обеспечивала удобный доступ к информации, а также позволяла фиксировать изменения температуры с заданной периодичностью, что является важным для дальнейшего анализа работы системы. Таким образом, полученные результаты измерений позволили собрать детализированную информацию о температурных колебаниях в процессе работы как текстильного, так и металлического абсорберов.

Для обеспечения точности измерений использовались вторичные приборы, что позволило минимизировать ошибки, связанные с работой основных датчиков. При таком подходе максимальная абсолютная погрешность регистрации температур с термопар составляла не более 0.2 °C, что позволило получить достоверные данные, которые можно было использовать для

дальнейшего анализа теплотехнической эффективности исследуемых абсорберов солнечных коллекторов [13]. Важно отметить, что подобная точность является крайне важной для правильной интерпретации данных и выявления факторов, влияющих на работу коллекторов.

Показания температуры, полученные с помощью термопар, позволяли оценить эффективность теплообмена в различных типах абсорберов солнечных коллекторов. Одним из главных показателей является КПД, который отражает, какая доля солнечной энергии преобразуется в теплоту и передается теплоносителю. Металлические абсорберы обладают высокой теплопроводностью, способны более эффективно передавать теплоту, однако их КПД может снижаться в условиях переменных температур и нестабильной солнечной радиации. С другой стороны, абсорберы из текстильных материалов хотя и имеют более низкую теплопроводность [10], обладают преимуществами в плане меньших потерь тепла в условиях переменной солнечной радиации, что делает их более эффективными в подобных ситуациях.

Для того чтобы определить теплотехническую эффективность различных типов абсорберов солнечных коллекторов, необходимо учитывать множество факторов, включая интенсивность солнечного излучения, температуру теплоносителя, расход теплоносителя через систему и другие параметры, которые могут значительно влиять на их КПД. В данном контексте важным элементом проведения таких исследований является использование различных измерительных приборов, таких как пиранометры [14] для оценки интенсивности солнечного излучения, термопары для измерения температуры [15], а также системы для контроля расхода теплоносителя.

Одним из инструментов, использованных в данном исследовании, был пиранометр марки М-80 [14], который применяется для измерения интенсивности солнечного излучения. Данный прибор был установлен перед имитатором солнечного излучения Е [10], который позволил измерить величину солнечной радиации на поверхности абсорбера. В процессе эксперимента интенсивность излучения на поверхности абсорбера была зафиксирована на уровне 390 Вт/м^2. При этом неравномерность лучистого потока не превышала 8 %, что свидетельствует о стабильности и точности эксперимента. Полученные данные были использованы для оценки теплотехнической эффективности как текстильного, так и металлического абсорберов солнечных коллекторов.

Для расчета КПД солнечных коллекторов в данном исследовании учитывались два различных расхода жидкости, проходящей через абсорбер. Эти два расхода составляли 34 и 59 л/час. Температура теплоносителя в процессе эксперимента колебалась в пределах 23–32 °C. Данные условия были выбраны для того, чтобы оценить поведение абсорберов солнечных коллекторов при различных уровнях теплоотдачи и для выявления оптимальных температурных режимов работы.

В процессе эксперимента мгновенный КПД солнечного коллектора рассчитывался на основе следующих показателей: интенсивности солнечного излучения [14], температуры теплоносителя и расхода жидкости через абсорбер. Рассчитанный мгновенный КПД η установки показывал, какая доля энергии, поступающей в коллектор с солнечным излучением, преобразуется в полезную теплоту, переданную теплоносителю. Рассматриваемый коэффициент необходим для оценки эффективности работы солнечного коллектора и позволяет сделать выводы о том, как

различные типы абсорберов, текстильные и металлические, справляются с передачей теплоты при различных условиях эксплуатации.

Расход жидкости через абсорбер также имеет решающее значение для вычисления КПД установки [15]. Чем больше жидкости проходит через него, тем больше теплоты может быть перенесено в систему. Однако слишком большой расход может снизить эффективность теплообмена, поскольку вода или другой теплоноситель может не успевать достаточно нагреться, что приведёт к потерям энергии. С другой стороны, при слишком низком расходе теплоноситель будет успевать нагреваться слишком сильно, что также может привести к снижению КПД из-за недостаточной циркуляции и эффективного использования солнечной энергии.

Используя эти данные, можно рассчитать мгновенный КПД солнечного коллектора, который будет отражать его теплотехническую эффективность при различных условиях эксплуатации:

$$\eta = \frac{\mathrm{g}c_p(t'' - t')}{E}. \qquad (1)$$

Одним из способов измерения КПД солнечного коллектора является использование пиранометра [14], который предназначен для измерения интенсивности солнечного излучения. В ходе проведения экспериментов, направленных на сравнение КПД текстильного и металлического абсорберов солнечных коллекторов, пиранометр марки М-80 [14] использовался для измерения интенсивности солнечного излучения на его поверхности. Однако при поиске точного значения КПД возникали определенные погрешности, которые необходимо учитывать при анализе полученных данных. Погрешность вычислений КПД в ходе экспериментов составляла ±12 %, что является значительным, но допустимым отклонением для большинства экспериментальных исследований в области солнечной энергетики. Наибольший вклад в эту погрешность вносила ошибка, связанная с определением плотности солнечного излучения, которое устанавливалось при помощи пиранометра [14]. Погрешность плотности солнечного излучения, измеряемая с помощью пиранометра, составляла ±8 %. Эта ошибка может быть связана с различными внешними факторами, такими как погодные условия, углы падения солнечных лучей и неравномерность распределения излучения [14].

Чтобы минимизировать влияние этих погрешностей на точность результатов, при обработке полученных данных использовались известные в литературе [16] уравнения Уиллера и Уиллера — Хоттеля — Блисса:

$$\eta = F_R\eta_0 - F_R U_L \frac{t' - t_0}{E} = A_1 - B_1 \cdot t_1 \qquad (2)$$

$$\eta = F'\eta_0 - F' U_L \frac{0{,}5(t' + t'') - t_0}{E} = \qquad (3)$$

$$= A_2 - B_2 \cdot t_2 \ .$$

Уравнения (2), (3) являются стандартными инструментами для расчета КПД солнечных коллекторов, и их использование позволяет компенсировать погрешности, связанные с измерениями. Уравнение Уиллера описывает связь между тепловыми потерями и эффективностью теплопередачи в солнечных коллекторах, что позволяет оценить потери энергии в процессе работы устройства. Уравнение Уиллера — Хоттеля — Блисса, в свою очередь, включает в себя более сложные факторы, такие как влияние скорости потока теплоносителя, его температуры и других переменных, которые могут существенно изменить теплотехнические характеристики солнечного коллектора. Оба уравнения позволяют учитывать факторы, которые в реальных условиях могут влиять на работу солнечного коллектора, и на основе полученных данных провести сравнительный анализ его эффективности [10].

Основным инструментом для оценки теплотехнической эффективности солнечных коллекторов являются уравнения, которые описывают тепловые процессы в системе и позволяют вычислить КПД на основе различных параметров. Уравнения (1)–(3) используются для расчёта КПД солнечных коллекторов с учётом таких факторов, как потери теплоты, эффективность поглощения солнечного излучения и теплоёмкость теплоносителя.

Уравнение для полного коэффициента потерь U_L выражает общие потери теплоты, которые происходят в солнечном коллекторе. Данные потери включают как теплопотери через поверхность коллектора, так и потери, связанные с теплопередачей к теплоносителю. Удельный расход циркулирующего теплоносителя определяется как $g=G/F_K$, где F_K — площадь коллектора, а G — расход жидкости через систему, параметр имеет большое значение, поскольку от него зависит эффективность теплообмена и скорость переноса теплоты в систему.

Важнейшими характеристиками абсорберов солнечных коллекторов являются их эффективность поглощения солнечного излучения F' и коэффициент отвода теплоты F_R. Эти параметры определяют, сколько энергии из солнечного излучения преобразуется в теплоту и как эффективно эта теплота передаётся в теплоноситель. Эффективность поглотителя солнечного излучения, F', зависит от конструкции коллектора и материалов, из которых он изготовлен. Для текстильного и металлического абсорберов эти значения могут сильно различаться, что влияет на общий КПД системы.

Для расчёта температуры теплоносителя используются два параметра: температура при входе в систему t' и температура при выходе из абсорбера t''. Эти температуры являются основными показателями того, насколько эффективно в абсорбере нагревается теплоноситель. Температура окружающей среды t_0 также участвует в процессе теплообмена, так как она влияет на теплопотери в системе. Чем выше разница между температурой теплоносителя и температурой окружающей среды, тем больший теплоотвод происходит в атмосферу, что снижает общий КПД системы. Температура теплоносителя при выходе из абсорбера t'' является основным параметром, определяющим, насколько эффективным было преобразование солнечной энергии в теплоту, а также, сколько энергии было передано к теплоносителю.

Оптический КПД солнечного коллектора, обозначаемый как η_0 — это коэффициент, который характеризует способность коллектора поглощать солнечную радиацию и преобразовывать её в теплоту. Для металлического и текстильного абсорберов η_0 может различаться, поскольку материалы, из которых изготовлены эти солнечные коллекторы, имеют разные оптические свойства. Металлические обычно имеют высокий оптический КПД, поскольку они хорошо поглощают солнечное излучение и эффективно передают теплоту теплоносителю. А текстильные материалы, в свою очередь, могут иметь несколько меньший оптический КПД, так как они могут менее эффективно поглощать солнечное излучение, что может снижать общую эффективность преобразования энергии.

Приведённая температура является еще одним важным параметром, который используется для оценки эффективности солнечных коллекторов. Данный параметр учитывает разницу между температурой теплоносителя и температурой окружающей среды, а также другие факторы, такие как температура коллектора и интенсивность солнечного излучения.

Приведённая температура позволяет более точно оценить, насколько эффективно солнечный коллектор работает при различных условиях внешней среды. В условиях переменной солнечной радиации и изменения температуры окружающей среды этот параметр помогает скорректировать результаты и получить более точные данные о теплотехнической эффективности коллектора.

Экспериментальные результаты

Для точного расчёта КПД и коэффициентов потерь теплоты необходимо учитывать множество факторов, таких как температура теплоносителя, интенсивность солнечного излучения, конструкция коллектора и характеристики материалов, из которых он изготовлен. В рамках данного исследования были использованы уравнения (2) и (3), которые описывают зависимость между температурой теплоносителя и КПД, а также позволяют оценить эффективность различных типов абсорберов солнечных коллекторов.

Из соотношений (2) и (3) видно, что необходимо установить линейную зависимость между приведённой температурой и КПД с условием, что другие параметры, такие как коэффициенты потерь и оптический КПД, остаются неизменными. Эта линейная зависимость является важным элементом для корректной оценки теплотехнической эффективности абсорберов солнечных коллекторов, так как она позволяет более точно прогнозировать их поведение в различных условиях эксплуатации.

Для выполнения экспериментальных исследований были использованы различные типы абсорберов солнечных коллекторов, включая текстильный и металлический. В ходе экспериментов были зафиксированы данные по КПД и коэффициентам потерь для солнечных коллекторов с трубчатой панелью, выполненной из текстильного материала, с прозрачным покрытием, представляющим собой сотовый поликарбонат толщиной 4 мм. Результаты расчётов и обработки данных, полученных из этих экспериментов, позволили получить следующие значения коэффициентов потерь и оптического КПД: для текстильного абсорбера солнечного коллектора с трубчатой панелью они составили $F'U_L = 4.79$ $Вт/(м^2 \cdot К)$; F' $\eta_0 = 0.73$, а для металлического F_R $U_L = 5{,}26$ $Вт/(м^2 \cdot К)$; F_R $\eta_0 = 0.71$ [10].

Эти результаты показывают, что текстильный абсорбер солнечного коллектора, несмотря на меньшую теплопроводность материала, способен сохранять оптимальные значения оптического КПД, что позволяет ему эффективно преобразовывать солнечное излучение в теплоту. В то же время металлический абсорбер благодаря высокой теплопроводности демонстрирует несколько лучшие результаты по коэффициенту потерь теплоты, однако его оптический КПД оказывается ниже, что указывает на меньшую эффективность поглощения солнечного излучения.

Результаты, полученные в ходе лабораторных экспериментов, позволяют сделать несколько важных выводов о сравнительной эффективности текстильного и металлического абсорбера солнечных коллекторов. Текстильный абсорбер коллектора обладает устойчивостью к изменениям температуры окружающей среды, что позволяет ему сохранять стабильную эффективность при переменной солнечной радиации. Металлический абсорбер, в свою очередь, демонстрирует более высокие значения теплопередачи, что делает их более эффективными при стабильных климатических условиях и высокой солнечной активности.

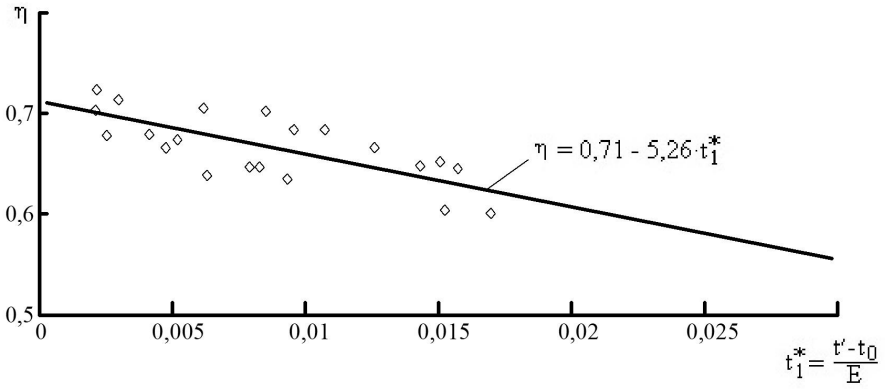

Рисунок 1 — Зависимость коэффициента потерь и оптического КПД от температуры теплоносителя для текстильного солнечного коллектора с трубчатой панелью и прозрачным покрытием (сотовый поликарбонат 4 мм)

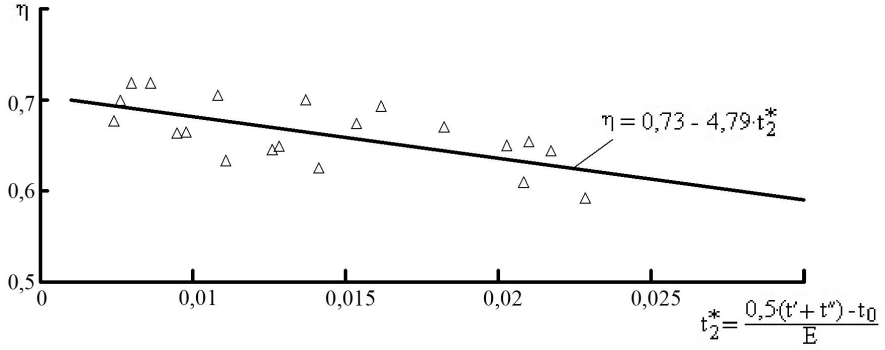

Рисунок 2 —Зависимость коэффициента потерь и оптического КПД от температуры теплоносителя для металлического абсорбера солнечного коллектора с трубчатой панелью

В ходе дальнейшего анализа данных, полученных с использованием уравнений (2) и (3), на рисунках 1 и 2 была установлена линейная зависимость между температурой теплоносителя и КПД.

Эта зависимость важна при оптимизации работы солнечных коллекторов в различных климатических условиях. Здесь важно отметить, что для повышения общей эффективности солнечных коллекторов необходимо учитывать как конструктивные особенности (материалы, форма панели), так и внешние условия, такие как температура окружающей среды и интенсивность солнечного излучения.

Значение коэффициента потерь $F'U_L$ для текстильного абсорбера солнечного коллектора оказалась несколько ниже, чем для металлического, что указывает на меньшие теплопотери в системе. Однако, в условиях нестабильной солнечной радиации и изменяющейся температуры, текстильный абсорбер коллектора может иметь преимущества за счёт меньших потерь тепла в холодное время года. С другой стороны, металлические абсорберы с их высокой теплопроводностью более эффективны при интенсивной солнечной радиации, но могут терять теплоту быстрее в условиях низкой температуры окружающей среды.

Оптический КПД η_0, определяемый для каждого типа солнечного коллектора, также имеет *большое* значение для оценки его эффективности. Для текстильного абсорбера оптический КПД составил 0.73, что свидетельствует о хорошем поглощении солнечной радиации, в то время как для металлического этот показатель был несколько ниже и составил 0.71. Это

подтверждает, что текстильный материал обладает хорошими характеристиками для поглощения солнечного излучения, что особенно важно в условиях переменной солнечной активности и при необходимости использовать солнечную энергию в более широком диапазоне температур.

Важным элементом в анализе теплотехнической эффективности является использование линейной зависимости между приведённой температурой и КПД, что позволяет точно прогнозировать поведение солнечного коллектора при изменении внешних условий. Эти зависимости являются ключевыми при проектировании и оптимизации солнечных энергетических систем, так как позволяют учесть все изменения температуры и солнечной радиации, а также правильно выбрать тип коллектора для конкретных условий эксплуатации.

На рисунке 3 приведены данные, полученные в ходе проведения исследований по мгновенным КПД солнечного коллектора РГУ им. А. Н. Косыгина с абсорбером, выполненным из текстильного материала трубчатого типа. Эти данные сопоставлены с результатами экспериментов других солнечных коллекторов отечественного производства, которые были рассмотрены в работах [17–19]. Такой подход позволяет провести более глубокий анализ и сделать выводы о сравнительной эффективности различных типов солнечных коллекторов, используя реальные экспериментальные данные.

Результаты экспериментов, приведённые на рисунке 3, показывают, что текстильный трубчатый абсорбер солнечного коллектора способен достигать достаточных значений мгновенного КПД при определённых условиях. Это подтверждается данными, полученными в ходе испытаний, которые показывают, что при оптимальных условиях солнечного излучения и температурного режима текстильный абсорбер коллектора может работать с эффективностью, сравнимой с металлическим аналогом. Однако при определённых изменениях внешних условий, например, при снижении температуры окружающей среды или изменении интенсивности солнечного излучения, их эффективность может несколько снизиться.

Для оценки сравнительной эффективности различных абсорберов коллекторов важно учитывать не только мгновенные значения КПД, но и долгосрочные характеристики их работы. Например, металлические абсорберы солнечных коллекторов благодаря своей высокой теплопроводности могут обеспечивать более стабильную работу в условиях постоянной солнечной радиации [20].

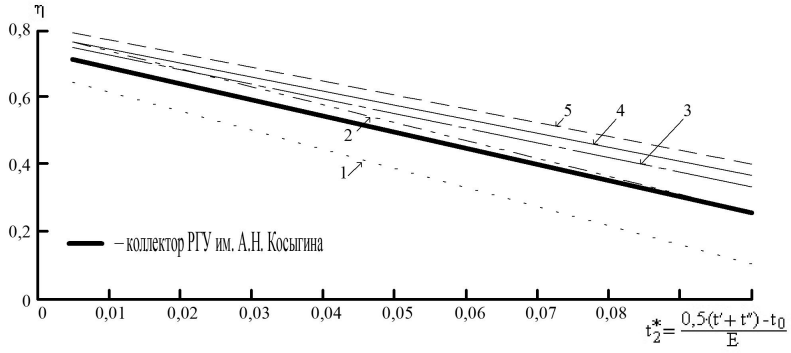

Рисунок 3 — Сравнительный анализ мгновенных КПД солнечного коллектора с текстильным трубчатым абсорбером и других солнечных коллекторов отечественного производства:
1 — полимерный СК ОИВТ РАН; 2 — «Альтерн–1»; 3 — ОАО «КМЗ»; 4 — «Радуга–М»; 5 — «Сокол»

Они способны быстро передавать теплоту от абсорбера к теплоносителю, что повышает их общую эффективность при стабильных климатических условиях. Однако они также могут терять теплоту в условиях низкой солнечной радиации, что снижает их эффективность в периоды, когда интенсивность солнечного излучения не так высока.

Сравнение данных мгновенных КПД для различных типов солнечных коллекторов позволяет сделать вывод о том, что текстильный абсорбер, несмотря на его меньшую теплопроводность, обладает определенным преимуществом, особенно в условиях переменной солнечной активности. Данные установки могут быть эффективными при изменяющихся температурных условиях и нестабильной солнечной радиации. В отличие от металлического абсорбера, текстильные имеют тенденцию к меньшим теплопотерям в холодные периоды, что позволяет им работать более эффективно в условиях низкой температуры.

Результаты и обсуждение

Из представленных данных, приведённых на рисунке 3, можно сделать вывод о том, что теплотехническая эффективность солнечного коллектора РГУ им. А. Н. Косыгина с абсорбером, выполненным из текстильного материала, незначительно уступает отечественным металлическим аналогам водонагревательных панелей, однако она превосходит образец опытного солнечного коллектора с абсорбером из полимерного материала, разработанного в Институте высоких температур РАН. Этот вывод основан на сравнении мгновенных КПД, которые были получены в ходе экспериментов с различными типами солнечных коллекторов, учитывая их характеристики при разных эксплуатационных условиях.

Солнечный коллектор с текстильным абсорбером представляет собой альтернативный вариант классическому, выполненному из металла, который традиционно применяется в системе солнечного водонагрева. Важным преимуществом текстильного абсорбера является использование материалов, которые обладают меньшей массой и гибкостью, что делает их более удобными для использования в различных условиях. Однако, как показали эксперименты, абсорбер из текстильного материала имеет не такую высокую теплопроводность, как металлические аналоги. Это обусловлено тем, что текстильный материал, в отличие от металлов, не обладает той же способностью быстро передавать теплоту от абсорбера к теплоносителю. В результате КПД текстильного абсорбера в идеальных условиях солнечного излучения несколько уступает металлическим моделям, но это отставание является незначительным.

В ходе испытаний, представленных на рисунке 3, было установлено, что солнечные коллекторы РГУ им. А. Н. Косыгина с текстильным абсорбером демонстрируют хорошие результаты, особенно в условиях переменной солнечной радиации. Несмотря на то, что их КПД немного ниже по сравнению с металлическими коллекторами, они показывают вполне конкурентоспособные результаты и могут эффективно использоваться в качестве источников солнечной теплоты в условиях переменной солнечной активности.

Что касается полимерного абсорбера солнечного коллектора, то он также имеет свои преимущества, такие как стойкость к внешним воздействиям и устойчивость к коррозии, однако по теплотехническим характеристикам он уступает как металлическому, так и текстильному абсорберу. Полимерный абсорбер, используемый в опытных солнечных коллекторах, показал

наименьший КПД в сравнении с текстильным и металлическими аналогами, что может быть связано с особенностями их теплопередачи и прочностными характеристиками. Однако эти данные подчёркивают важность дальнейших исследований и разработок в области полимерных материалов для солнечных коллекторов, так как полимерные технологии могут в будущем предложить более эффективные и экономически выгодные решения.

По сравнению с металлическим абсорбером солнечных коллекторов, абсорбер, выполненный из текстильного материала, имеет определённые ограничения, связанные с более низкой теплопроводностью и возможными дополнительными тепловыми потерями. Тем не менее результаты экспериментов показали, что абсорбер из текстильного материала может работать эффективно в условиях, где традиционные металлические системы могут столкнуться с проблемами из-за высокой стоимости или сложности в обслуживании. В таких случаях абсорберы из текстильного материала представляют собой конкурентоспособное решение, которое позволяет значительно снизить стоимость установки и эксплуатации системы, при этом сохраняя приемлемый уровень теплотехнической эффективности.

Для дальнейших исследований необходимо продолжить оценку влияния различных факторов на эффективность текстильных абсорберов солнечных коллекторов, таких как погодные условия, интенсивность солнечного излучения и температура окружающей среды. Кроме того, следует провести долгосрочные испытания, чтобы убедиться в надёжности и долговечности этих систем при различных эксплуатационных условиях. На основе этих данных можно будет разработать рекомендации по оптимальному использованию текстильных абсорберов в системах солнечного отопления и водоснабжения, а также продолжить совершенствование материалов и конструкций, что позволит повысить их теплотехническую эффективность и сделать их более конкурентоспособными на рынке солнечных технологий.

Подводя итог, можно отметить, что текстильные абсорберы являются перспективным вариантом для использования в солнечной энергетике, особенно с учётом их более низкой стоимости и простоты установки. Несмотря на то, что они несколько уступают металлическим в теплотехнической эффективности, их способность эффективно работать при переменной солнечной радиации и других изменяющихся внешних условиях делает их подходящим решением для определённых эксплуатационных условий. Сравнительный анализ, представленный в статье, подчёркивает важность дальнейших исследований и оптимизации этих систем для повышения их эффективности и конкурентоспособности на рынке солнечных технологий.

Заключение

Сравнительный анализ теплотехнической эффективности текстильного и металлических абсорберов солнечных коллекторов, проведённый в рамках данного исследования, показал значительный потенциал использования текстильных материалов в солнечной энергетике. Хотя текстильный абсорбер солнечного коллектора несколько уступает металлическим по теплотехническим характеристикам, результаты испытаний показали, что их производительность и эффективность могут быть весьма конкурентоспособными при определенных условиях эксплуатации. Использование текстильных абсорберов в солнечных коллекторах, в частности в коллекторных панелях с трубчатой конструкцией, демонстрирует значительное снижение затрат на установку и эксплуатацию

по сравнению с металлическими аналогами, что является важным фактором при выборе технологических решений для применения в солнечной энергетике.

При исследовании мгновенных КПД текстильного трубчатого абсорбера солнечного коллектора стало очевидным, что в условиях переменной солнечной активности и низкой температуры текстильный абсорбер может работать не хуже металлических, что подтверждается сопоставлением данных, представленных на рисунке 3. Это открывает дополнительные возможности для использования таких систем в различных климатических зонах, где традиционные металлические солнечные коллекторы не всегда могут быть оптимальным решением из-за более высоких эксплуатационных затрат и сложности установки.

Текстильный абсорбер солнечного коллектора обладает рядом других важных преимуществ. Он характеризуется меньшей массой и гибкостью конструкции, что упрощает его транспортировку и монтаж. Это устройство не подвержено таким проблемам, как коррозия, что увеличивает его долговечность и снижает требования к обслуживанию. Важно также отметить, что текстильный абсорбер системы солнечного коллектора обладает хорошей адаптивностью к изменяющимся внешним условиям. Это делает его идеальным для использования в условиях нестабильной солнечной радиации и переменных температур. В отличие от металлических коллекторов, которые могут терять эффективность при колебаниях температуры и солнечной активности, текстильные абсорберы обеспечивают более стабильную работу в условиях переменного климата.

Сравнение текстильного абсорбера солнечного коллектора с полимерной системой, разрабатываемой в Институте высоких температур РАН, показало, что текстильный абсорбер значительно превосходит полимерный аналог по теплотехнической эффективности. Полимерная система хотя и предлагает определённые преимущества в плане устойчивости к внешним воздействиям и долговечности, всё же имеет более низкий КПД, что ставит под сомнение её эффективность в долгосрочной эксплуатации при различных климатических условиях. Это открывает возможности для дальнейших исследований и разработки материалов, которые смогут сочетать преимущества полимерных и текстильных решений, обеспечивая при этом высокую теплотехническую эффективность и долгосрочную эксплуатационную надёжность.

Результаты экспериментов подтвердили, что текстильный абсорбер солнечного коллектора может эффективно использоваться в качестве источника солнечной теплоты в регионах с переменной солнечной активностью. Хотя его КПД несколько ниже, чем у металлических абсорберов, он демонстрирует хорошую производительность в условиях неполной солнечной радиации, что позволяет компенсировать возможные потери за счёт более низкой стоимости установки и обслуживания. Также стоит отметить, что текстильный солнечный коллектор имеет значительные преимущества с точки зрения экономической привлекательности, поскольку его стоимость ниже, а процесс его производства и установки менее трудозатратен.

Важным выводом является то, что для достижения наилучших результатов в солнечной энергетике необходимо учитывать специфические эксплуатационные условия каждого региона и выбирать наиболее подходящий тип солнечного коллектора с учётом местных климатических особенностей. Солнечные коллекторы с абсорбером из текстильного материала представляют собой эффективное решение для многих

климатических зон, где высокая стоимость металлических панелей и сложность их обслуживания могут быть ограничивающим фактором. Кроме того, в случае, если при проектировании системы требуются лёгкие и гибкие материалы, текстильные абсорберы могут стать предпочтительным выбором.

Долгосрочные перспективы использования солнечных коллекторов с абсорбером из текстильного материала заключаются в дальнейшем улучшении их теплотехнических характеристик. В будущих исследованиях важно сосредоточиться на оптимизации конструкции и материалах, что позволит снизить теплопотери и повысить КПД. Особенно перспективным является использование новых материалов, которые могут сочетать преимущества высокой теплопроводности металлических систем с лёгкостью и гибкостью текстильных конструкций. Это откроет новые возможности для создания эффективных и экономичных солнечных коллекторов, которые смогут конкурировать с традиционными металлическими решениями на мировом рынке.

С учётом результатов проведённого анализа можно утверждать, что солнечные коллекторы с абсорбером из текстильного материала представляют собой вполне конкурентоспособный вариант для использования в солнечной энергетике с возможностью дальнейшего развития и улучшения их характеристик. Важно отметить, что текстильные и металлические системы солнечных коллекторов могут взаимно дополнять друг друга, и их совместное использование в рамках одной системы может существенно повысить общую эффективность солнечной энергетики, предлагая оптимальные решения для разных климатических и эксплуатационных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Птицына А. А. Факторы использования возобновляемой энергетики в России. *Вестник науки*, 2024, №6 (75), с. 326–334.

[2]. Мартыненко Т. В., Коноплева В. Д. Политика Российской Федерации в области возобновляемой энергетики: современное состояние, законодательная база и перспективы развития. *Государственное и муниципальное управление. Ученые записки.* 2022, №1, с. 127–132.

DOI: 10.22394/2079-1690-2022-1-1-127-132

[3]. Перминов Э. М. Современная возобновляемая энергетика. Ч. 1. Мировой опыт. Библиотечка электротехника, 2022, № 2(277), с. 1–92.

[4]. Дидиков А. Е. К вопросу использования альтернативных источников солнечной энергии в системах теплоснабжения промышленных и бытовых потребителей. *Экономика и экологический менеджмент*, 2012, №2, с. 135–143

[5]. Zhmakin L. I., Sharpar N. M. Simulation of Heat Transport in a Solar Air Collector with Porous Absorber. *Fibre Chemistry*, 2018, Vol. 49, No. 5, p. 338–341. DOI 10.1007/s10692-018-9894-2.

[6]. Ермуратский В. В., Капралов А. И. Производительность солнечных нагревателей воды ёмкостного типа с гибким полимерным абсорбером. *Проблемы региональной энергетики*, 2008, №2, с. 8–14.

[7]. Велижанин А. А. и др. Изучение устройства и принципа действия солнечного коллектора. М. : Издательский центр РГУ нефти И.М. Губкина, 2023, 74 с.

[8]. Шарпар Н. М., Жмакин Л. И., Кирсанова А. Е. Эффективность водонепроницаемой текстильной панели радиационно-конвективного теплообменника. *Дизайн и технологии*, 2021, № 81(123), с. 75–80.

[9]. Кувшинов В. В. и др. Экспериментальные исследования приемных поверхностей плоских солнечных коллекторов. *ЭОМ*, 2021, №1, с. 75–81

[10]. Жмакин Л. И., Шарпар Н. М. Полимерные и текстильные материалы в установках солнечной энергетики. Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2021, 195 с.

[11]. Контрольно-измерительные приборы ОВЕН. URL: http://www.owen.ru

[12]. Федоренко В. В., Кузьмин А. В. Сбор и хранение данных в автоматизированной системе контроля температуры объекта. *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные* технологии, системы управления, 2017, №24, с. 105–120.

[13]. Белоусов О. Г., Белых А. В. Расчёт погрешности измерения температуры. *Вестник Восточно-Сибирского института МВД России*, 2011, №4, с. 65–75

[14]. Шарпар Н. М., Жмакин Л. И. Технологические схемы и установки для использования солнечной энергии. М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2023, 240 с.

[15]. Бекиров Э. А., Велиляев С. М. Определение эффективности работы солнечного коллектора. *Агротехника и энергообеспечение*, 2021, №4 (33), с. 8-15

[16]. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, 2 Ed. USA: J.Wiley & Sons, 1991, 919 p.

[17]. Виссарионов В. И. и др. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии: справочник. Москва : Изд. «ВИЭН», 2004, 448 с.

[18]. Тарнижевский Б. В. Солнечные коллекторы нового поколения. *Теплоэнергетика*, 1992, №4, с. 23–26.

[19]. Тарнижевский Б. В., Абуев И. М. Технический уровень и освоение производства плоских солнечных коллекторов в России. *Теплоэнергетика*, 1997, №4, с. 18–22.

[20]. Карташев А. Л., Сафонов Е. В., Карташева М. А. Исследование схем, конструкций, технических решений плоских солнечных термальных коллекторов. *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*, 2012, №16 (275), с. 4–10

Шарпар Николай Михайлович — канд. техн. наук, доцент, Доцент, Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Жмакин Леонид Иванович — д–р техн. наук, профессор, профессор кафедры Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Маркова Каринэ Александровна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Власов Илья Николаевич — аспирант, кафедра «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность», Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Comparative analysis of thermal efficiency of solar collectors with absorbers made of different materials

N. M. Sharpar[*,1], L. I. Zhmakin[*], K. A. Markova[*], I. N. Vlasov[*]

**The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

One of the urgent tasks of modern industry is to improve the equipment of existing production facilities. Designing new devices, as well as improving existing ones, is impossible without analyzing the advantages and disadvantages of equipment used in industry. This task includes the search for constructive solutions to improve regenerative heat exchangers (to increase the efficiency of the heat transfer process). The efficiency of the heat transfer process in regenerative heat exchangers is evaluated taking into account the amount of heat transferred (in accordance with the basic heat transfer equation), as well as various relative indicators (for example, in relation to the energy spent on pumping heat carriers during operation of the heat exchanger to the amount of heat transferred). The article presents an analysis of the patented designs of regenerative heat exchangers (used in chemical, food and related industries) shell-and-tube apparatuses, plate apparatuses, pipe-in-pipe apparatuses and crystallizers. The most important and promising areas of design of heat exchangers of these types have been identified — energy saving during operation of the apparatus, resource saving in the manufacture of the apparatus, the desire to reduce overall dimensions and simplify the design of the apparatus. Based on the analysis, promising areas for improving regenerative heat exchangers have been identified.

Keywords

Textile material, efficiency, experimental studies, absorber, solar radiation, heat transfer, alternative materials.

REFERENCES

[1]. Ptitsyna A. A. Faktory ispol'zovaniya vozobnovlyayemoy energetiki v Rossii [Factors of the use of renewable energy in Russia]. *Vestnik nauki [Bulletin of Science]*, 2024, №6 (75), p. 326-334. (In Russ.)

[2]. Martynenko T.V., Konopleva V. D. Politika Rossiyskoy Federatsii v oblasti vozobnovlyayemoy energetiki: sovremennoye sostoyaniye, zakonodatel'naya baza i perspektivy razvitiya [Policy of the Russian Federation in the field of renewable energy: current state, legislative framework and prospects for development]. *Gosudarstvennoye i munitsipal'noye upravleniye. Uchenyye zapiski [State and Municipal Management. Scientific Notes]*. 2022, №1, p. 127–132. (In Russ.)

DOI: 10.22394/2079-1690-2022-1-1-127-132

[1] *Corresponding author:*
Email: sharpar753@mail.ru

[3]. Perminov E. M. Sovremennaya vozobnovlyayemaya energetika. CH. 1. Mirovoy opyt [Modern renewable energy. P. 1. World experience]. *Biblioteka elektrotechnika* [*Electrical Engineering Library*], 2022, № 2(277), p. 1–92. (In Russ.)

[4]. Didikov A. E. K voprosu ispol'zovaniya al'ternativnykh istochnikov solnechnoy energii v sistemakh teplosnabzheniya promyshlennykh i bytovykh potrebiteley [On the issue of using alternative solar energy sources in heat supply systems for industrial and domestic consumers]. *Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment [Economics and Environmental Management],* 2012, №2, p. 135–143. (In Russ.)

[5]. Zhmakin L. I., Sharpar N. M. Simulation of Heat Transport in a Solar Air Collector with Porous Absorber. *Fibre Chemistry*, 2018, Vol. 49, No. 5, p. 338–341. DOI 10.1007/s10692-018-9894-2.

[6]. Ermuratskiy V. V., Kapralov A. I. Proizvoditel'nost' solnechnykh nagrevateley vody yomkostnogo tipa s gibkim polimernym absorberom [Performance of solar water heaters of a capacitive type with a flexible polymer absorber]. *Problemy regional'noy energetiki [Problems of regional energy]*, 2008, №2, p. 8–14. (In Russ.)

[7]. Velizhanin A. A. et al. Izucheniye ustroystva i printsipa deystviya solnechnogo kollektora [Studying the device and principle of operation of a solar collector]. Moscow, Gubkin Russian State University of Petroleum Publishing Center, 2023, 74 p. (In Russ.)

[8]. Sharpar N. M., Zhmakin L. I., Kirsanova A. E. Effektivnost' vodonepronitsayemoy tekstil'noy paneli radiatsionno-konvektivnogo teploobmennika [Efficiency of the waterproof textile panel of the radiation-convective heat exchanger]. *Dizayn i tekhnologii [Design and Technology]*, 2021, № 81(123), p. 75–80.

[9]. Kuvshinov V. V. et al. Eksperimental'nyye issledovaniya priyemnykh poverkhnostey ploskikh solnechnykh kollektorov [Experimental studies of receiving surfaces of flat solar collectors]. *ЭОМ*, 2021, №1, c. 75–81. (In Russ.)

[10]. Zhmakin L. I., Sharpar N. M. Polimernyye i tekstil'nyye materialy v ustanovkakh solnechnoy energetiki [Polymer and textile materials in solar energy installations]. Moscow, The Kosygin State university of Russia Publ., 2021, 195 p. (In Russ.)

[11]. Control and measuring devices OVEN. URL: http://www.owen.ru

[12]. Fedorenko V. V., Kuzmin A. V. Sbor i khraneniye dannykh v avtomatizirovannoy sisteme kontrolya temperatury ob"yekta. [Data collection and storage in an automated object temperature control system] *Vestnik PNIPU. Elektrotekhnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of PNRPU. Electrical engineering, information technology, control systems], 2017, №24, p. 105–120. (In Russ.)

[13]. Belousov O. G., Belykh A. V. Raschot pogreshnosti izmereniya temperatury [Calculation of the temperature measurement error]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii [Bulletin of the East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia]*, 2011, №4, p. 65–75. (In Russ.)

[14]. Sharpar N. M., Zhmakin L. I. Tekhnologicheskiye skhemy i ustanovki dlya ispol'zovaniya solnechnoy energii [Technological schemes and installations for the use of solar energy]. Moscow, The Kosygin State university of Russia Publ., 2023, 240 p. (In Russ.)

[15]. Bekirov E. A., Velilyaev S. M. Opredeleniye effektivnosti raboty solnechnogo kollektora [Determination of the efficiency of a solar collector]. *Agrotekhnika i energoobespecheniye [Agrotechnics and energy supply]*, 2021, №4 (33), p. 8–15. (In Russ.)

[16]. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, 2 Ed. USA: J.Wiley & Sons, 1991, 919 p.

[17]. Vissarionov V. I. et al. Energeticheskoye oborudovaniye dlya is-pol'zovaniya netraditsionnykh i vozobnovlyayemykh istochnikov energii: spravochnik [Energy

equipment for the use of non-traditional and renewable energy sources: a reference book]. Moscow, «VIEN» Publ., 2004, 448 p. (In Russ.)

[18]. Tarnizhevskiy B. V. Solnechnyye kollektory novogo pokoleniya [Solar collectors of a new generation]. *Teploenergetika [Thermal power engineering],* 1992, №4, p. 23–26. (In Russ.)

[19]. Tarnizhevskiy B. V., Abuev I. M. Tekhnicheskiy uroven' i osvoyeniye proizvodstva ploskikh solnechnykh kollektorov v Rossii [Technical level and mastering of the flat solar collectors production in Russia]. *Teploenergetika [Thermal power engineering]*, 1997, №4, p. 18–22. (In Russ.)

[20]. Kartashev A. L., Safonov E. V., Kartasheva M. A. Issledovaniye skhem, konstruktsiy, tekhnicheskikh resheniy ploskikh solnechnykh termal'nykh kollektorov [Investigation of schemes, structures, and technical solutions of flat solar thermal collectors]. *Vestnik YUUrGU. Seriya: Energetika [Bulletin of SUSU. Series: Energy]*, 2012, № 16(275), c. 4–10 (In Russ.)

Sharpar N. M. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Zhmakin L. I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Markova K. A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Vlasov I. N. — postgraduate student, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сравнительный анализ теплотехнической эффективности солнечных коллекторов с абсорберами из различных материалов / Н. М. Шарпар, Л. И. Жмакин, К. А. Маркова, И. Н. Власов // Промышленные процессы и технологии. 2024. Т. 4. № 4(14). С. 65 – 81.

DOI: 10.37816/2713-0789-2024-4-4(14)-65-81

Please cite this article as:

Sharpar N. M., Zhmakin L. I., Markova K. A., Vlasov I. N. Comparative analysis of thermal efficiency of solar collectors with absorbers made of different materials. Industrial processes and Technologies, 2024, vol. 4, no. 4(14). pp. 65 – 81.

DOI: 10.37816/2713-0789-2024-4-4(14)-65-81