

Научно-технический журнал

# ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Выпуск #1 (2025)

## Энергетические системы и комплексы

Махсумов И.Б. Комплексный анализ факторов, влияющих на эффективность солнечных элементов

## Турбомашины и поршневые двигатели

Пшениснов Н.А. Анализ распределения температур масла в опорном подшипнике турбоагрегата

## Краткие сообщения. Успехи в области энергетики и турбостроения

Шайдуллаев Р.Б., Токтоназаров С.Т., Омуров Ж.К.  
Экспериментальная парогенераторная установка для повышения теплотворности низкосортных углей

Чжу Синьюй, Биань Ивэнь, Лю Чан. Сохранение архитектурного наследия зданий при интеграции фотоэлектрических систем

# 0 журнале

## Краткая информация

Журнал «Тепловые электрические станции» – ежеквартальный научно-практический рецензируемый журнал.

Журнал публикует материалы о современном состоянии науки и техники в области тепловой энергетики, теплотехники, турбомашиностроения и смежных областях. Освещает вопросы рационального и эффективного использования топливно-энергетических ресурсов, экологически чистых и безотходных технологий, возобновляемых источников энергии, материалов, теплофикации, решения наиболее важных научно-технических проблем в области энергетики. Журнал рассчитан на ученых и специалистов, работающих на электростанциях и предприятиях энергомашиностроительной промышленности, инженеров-исследователей, научно-педагогических работников и обучающихся по профильным направлениям.

Журнал находится в открытом доступе. За публикацию рукописей плата с авторов, включая студентов и аспирантов, не взимается. Авторский гонорар за издание статей не начисляется.

**Журнал «Тепловые электрические станции» индексируется в РИНЦ.**

## История переименований

С 2013 г. по 2025 г. «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых».

С апреля 2025 г. переименован в «Тепловые электрические станции».

## Разделы журнала

1. Энергетические системы и комплексы.
2. Турбомашинны и поршневые двигатели.
3. Краткие сообщения. Успехи в области энергетики и турбомашиностроения.

## Учредитель

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский  
государственный университет  
(национальный исследовательский  
университет)»

## Редакционная коллегия

### Главный редактор:

Осинцев К.В., доктор техн. наук

### Зам. главного редактора:

Пшениснов Н.А., канд. техн. наук

### Члены редколлегии:

Кирпичникова И.М., доктор техн. наук

Соломин Е.В., доктор техн. наук

Возмилов А.Г., доктор техн. наук

Ганджа С.А., доктор техн. наук

Тягунов М.Г., доктор техн. наук

Горожанкин А.Н., доктор техн. наук

Задорожная Е.А., доктор техн. наук

Леванов И.Г., доктор техн. наук

## Редакция

## Контакты

### Адрес редакции:

454080, г. Челябинск, просп. В.И.  
Ленина, д. 76

### Телефоны:

+7 (351) 267-93-95

+7 (952) 527 67 24

### E-mail:

thermalpowerplants@mail.ru

### Веб-сайт:

www.tes.susu.ru

Научно-технический журнал

# ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Выпуск #1 (2025)

## Содержание

### Энергетические системы и комплексы

**Махсумов И.Б.** Комплексный анализ факторов, влияющих на  
эффективность солнечных элементов..... 2

### Турбомашины и поршневые двигатели

**Пшениснов Н.А.** Анализ распределения температур масла в  
опорном подшипнике турбоагрегата..... 10

### Краткие сообщения. Успехи в области энергетики и турбомашиностроения

**Шайдуллаев Р.Б., Токтоназаров С.Т., Омуров Ж.К.**  
Экспериментальная парогенераторная установка для повышения  
теплотворности низкосортных углей..... 16

**Чжу Синьюй, Биань Ивэнь, Лю Чан.** Сохранение архитектурного  
наследия зданий при интеграции фотоэлектрических систем..... 20

## Энергетические системы и комплексы

### КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- **Махсумов И.Б.**, канд. техн. наук, Таджикский энергетический институт, р-н. Кушониён, Республика Таджикистан

### COMPREHENSIVE ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS

- **Makhsumov I.B.**, Ph.D. of Engineering Sciences, Tajik Power Engineering Institute, Kushoniyon District, Republic of Tajikistan

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергетической эффективности солнечных элементов в условиях воздействия климатических и эксплуатационных факторов. Несмотря на то, что технические решения и методы, применяемые в работе, являются известными в науке и практике, их систематизация и адаптация к реальным условиям эксплуатации представляют практическую ценность.

Целью исследования является комплексный анализ влияния факторов окружающей среды на эффективность работы солнечных модулей и разработка рекомендаций по минимизации негативных эффектов. Для достижения цели решались задачи оценки влияния запыленности, температуры, влажности и затенения на характеристики фотоэлектрических систем.

Методы исследования включали натурные испытания солнечных модулей, моделирование вольт-амперных характеристик при различных климатических условиях, а также сравнительный анализ данных, полученных в ходе исследований, с результатами, представленными в научной литературе.

Полученные результаты подтвердили соответствие выявленных закономерностей ранее известным научным данным. Работа демонстрирует, что загрязнение поверхности панелей снижает эффективность до 25%, повышение температуры приводит к снижению мощности на 0,4% на каждый градус Цельсия, а высокая влажность ускоряет деградационные процессы. Сопоставление результатов исследования с литературными источниками свидетельствует о корректности выбранных методов и обоснованности практических рекомендаций, направленных на повышение надёжности и энергетической производительности фотоэлектрических систем в неблагоприятных климатических условиях.

**Ключевые слова:** солнечные элементы, фотоэлектрические модули, эффективность, запыленность, температура, влажность, эксплуатация.

The relevance of the study is due to the need to improve the energy efficiency of solar cells under the influence of climatic and operational factors. Despite the fact that technical solutions and methods used in the work are known in science and practice, their systematisation and adaptation to real operating conditions are of practical value. The aim of the study is a comprehensive analysis of the influence of environmental factors on the efficiency of solar modules and the development of recommendations to minimise negative effects.

To achieve the goal, the tasks of assessing the influence of dust, temperature, humidity and shading on the characteristics of photovoltaic systems were solved.

The research methods included field tests of solar modules, modelling of volt-ampere characteristics under different climatic conditions, as well as comparative analysis of the data obtained during the research with the results presented in the scientific literature.

The obtained results confirmed the conformity of the revealed regularities with previously known scientific data. The work demonstrates that contamination of the panel surface reduces efficiency by up to 25%, temperature increase leads to power reduction by 0.4% for each degree Celsius, and high humidity accelerates degradation processes. Comparison of the research results with literature sources indicates the correctness of the selected methods and validity of practical recommendations aimed at improving the reliability and energy performance of photovoltaic systems in unfavourable climatic conditions.

**Key words:** solar cells, photovoltaic modules, efficiency, dust, temperature, humidity, operation.

## Введение

В современных условиях стремительного развития возобновляемой энергетики солнечные элементы играют ключевую роль в обеспечении устойчивого энергоснабжения. Однако их эффективность во многом зависит от воздействия факторов окружающей среды, которые могут существенно снижать выходную мощность и долговечность фотоэлектрических систем.

Постановка задачи исследования обусловлена необходимостью комплексного учёта климатических, эксплуатационных и конструктивных условий, особенно в регионах с высокой солнечной активностью и экстремальными погодными параметрами. В таких условиях эффективность работы солнечных модулей может значительно снижаться, что требует научного анализа и разработки практических рекомендаций [1-2].

Наиболее значимыми факторами являются накопление пыли на поверхности панелей, температурные колебания, уровень влажности, а также эксплуатационные параметры, такие как конфигурация установки и техническое состояние модулей. Оседание пылевых частиц снижает проникновение солнечного излучения, температура влияет на электрические характеристики элементов, а влажность способствует деградации материалов [3].

Целью настоящей работы является комплексное исследование воздействия указанных факторов на эффективность работы солнечных элементов и выработка рекомендаций по минимизации их негативного влияния. В рамках исследования решаются задачи анализа влияния отдельных

климатических параметров, конструктивных особенностей и эксплуатационных условий на выходную мощность солнечных панелей.

## Обзор технологии солнечных элементов

Существует три основных класса солнечных элементов, среди которых наиболее распространены кремниевые фотоэлементы. Они подразделяются на два типа: монокристаллические и поликристаллические.

Монокристаллические фотоэлементы обладают наибольшей эффективностью, достигающей 26,7 % в лабораторных условиях [1]. Однако их производство требует сложных технологических процессов, что увеличивает стоимость и ограничивает массовое распространение.

Поликристаллические фотоэлементы, напротив, изготавливаются с использованием нескольких кристаллических зерен, что приводит к снижению эффективности по сравнению с монокристаллическими аналогами. Несмотря на это, благодаря более простой технологии производства их себестоимость ниже.

Несмотря на более высокие производственные затраты, монокристаллические фотоэлементы остаются доминирующим продуктом на рынке солнечных технологий. Их популярность обусловлена высокой эффективностью преобразования энергии, продолжительным сроком службы и качеством изготовления. Хотя их производство составляет лишь около 30 % от общей стоимости модуля, они про-

должают оставаться наиболее востребованными среди фотоэлектрических элементов [2-3].

Факторы, не связанные с окружающей средой, но влияющие на солнечные элементы, включают технические характеристики солнечных панелей. Качество материалов, таких как полупроводники, металлы и покрытия, напрямую влияет на эффективность преобразования солнечной энергии. Важным аспектом является также процесс производства: точность и технологические особенности при изготовлении солнечных панелей могут существенно повлиять на их производительность и долговечность. Конструкция и дизайн панелей, включая геометрию и форму, а также толщину слоев и тип соединений, определяют их общую эффективность.

Электрическая нагрузка и схемы подключения солнечных панелей также играют роль. Конфигурация системы, будь то сетевые или автономные установки, а также параллельное или последовательное подключение панелей, может влиять на общую производительность. Важным моментом являются местные потери энергии, вызванные сопротивлением проводников и неэффективностью инверторов.

Со временем солнечные элементы подвергаются старению, что снижает их эффективность. Долговечность материалов и физическое старение, включая деградацию тонких пленок

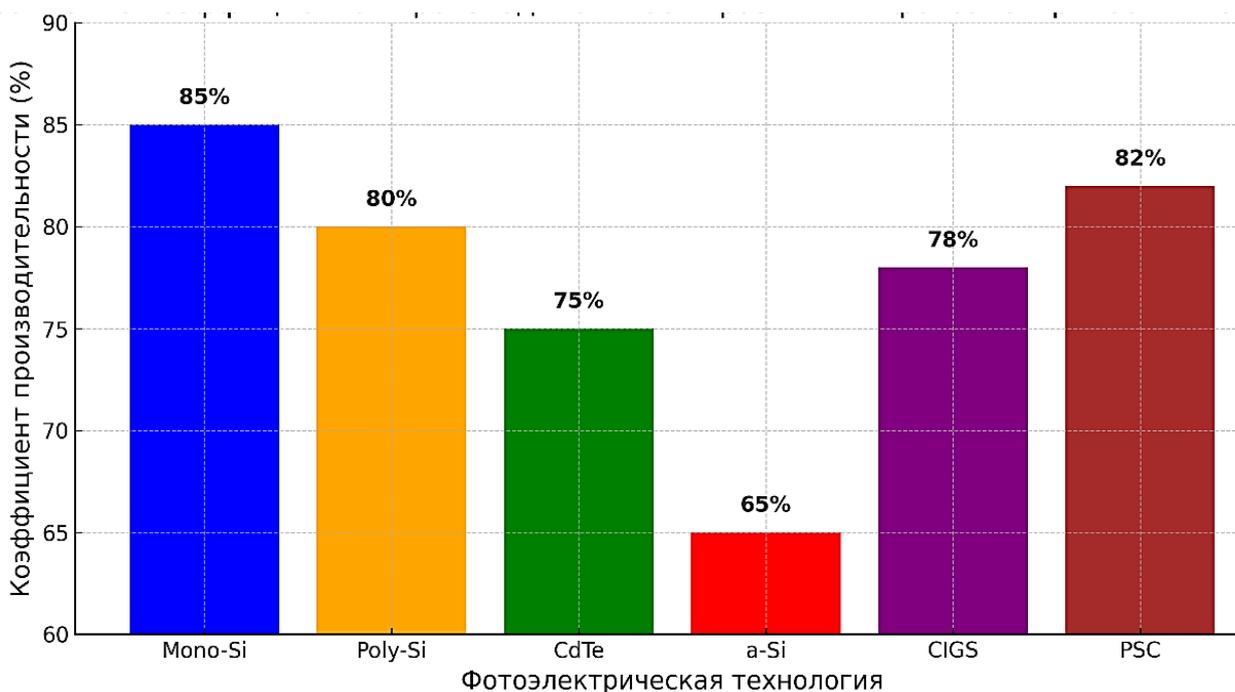
и других компонентов, могут существенно повлиять на производительность. Отсутствие регулярного обслуживания или неправильная настройка системы также приводит к снижению эффективности. Механические повреждения, такие как трещины или дефекты покрытия, могут уменьшить работоспособность солнечных панелей. Эти факторы важно учитывать при оптимизации работы солнечных элементов наряду с экологическими условиями [5].

На рисунке 1 показано сравнение коэффициентов производительности различных фотоэлектрических технологий.

### Факторы окружающей среды

Пыль на фотоэлектрических панелях снижает их выходную мощность, препятствуя проникновению солнечного излучения, вызывая неравномерное затенение и коррозию, а также увеличивает диффузное отражение света.

Температура окружающей среды влияет на рабочие параметры модулей: при ее повышении снижается рабочее напряжение и выходная мощность. Влажность уменьшает количество прямого солнечного излучения, а длительное воздействие влажного воздуха может привести к коррозии, увеличению проводимости материалов и росту токов утечки, что ухудшает характеристики модулей.



**Рис. 1. Сравнение коэффициентов производительности различных фотоэлектрических технологий**

Угол наклона панелей играет ключевую роль в оптимизации поглощения солнечной радиации, а затенение от конструкций или природных объектов снижает их эффективность. Для максимальной выработки энергии фотоэлектрические модули должны быть точно ориентированы на солнце.

#### *Влияние пыли на эффективность и производительность солнечных элементов*

Пыль представляет собой мельчайшие твердые частицы диаметром менее 500 мкм, которые могут образовываться из различных источников, включая ветер, движение людей и транспорта, вулканические извержения и загрязнение окружающей среды. Осаждение пыли на поверхностях, в том числе на фотоэлектрических модулях, зависит от множества факторов и может либо быстро удаляться, либо накапливаться со временем под воздействием скорости ветра [6].

Исследования, проведенные в аэродинамической трубе, показали, что направление ветра оказывает большее влияние на осаждение пыли, чем скорость воздушного потока [7]. Кроме того, количество накопленной пыли зависит от ориентации поверхности и направления ветра. Выявлено, что мелкие частицы пыли оказывают более значительное негативное влияние на эффективность фотоэлектрических модулей, чем крупные частицы. Мелкие частицы пыли образуют плотный слой на модулях, снижая пропускание света и выработку энергии на 10–20%. Они труднее удаляются, особенно при высокой влажности. Для минимизации используются очистка, гидрофобные покрытия и мониторинг загрязненности.

На рисунке 2 представлено сравнение вольт-амперных характеристик солнечных модулей в чистом и запыленном состоянии, демонстрирующее заметное снижение выходной мощности при наличии загрязнения. В частности, исследование [3] показало, что наиболее критическое воздействие на эффективность солнечных элементов оказывают пылевые частицы диаметром менее 50 мкм. Эти мелкодисперсные частицы обладают высокой адгезией к поверхности модулей и устойчивостью к ветровым нагрузкам, что значительно затрудняет их удаление естественными путями, например, под действием дождя или ветра. Они образуют плотный, равномерно распределенный слой, который снижает степень пропускания солнечного

излучения к фоточувствительным слоям модуля. В результате происходит падение тока короткого замыкания и, как следствие, общей вырабатываемой мощности. Это подчёркивает необходимость регулярной очистки панелей и разработки защитных покрытий, препятствующих оседанию и прилипанию мелких частиц пыли [3, 8].

#### *Влияние температуры на эффективность и производительность солнечных элементов*

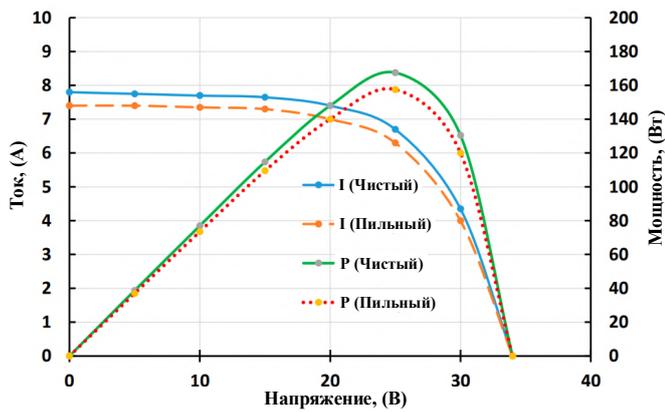
Температура существенно влияет на эффективность солнечных элементов. С повышением температуры эффективность панелей снижается из-за увеличения сопротивления материалов, что приводит к уменьшению выходной мощности. Для кремниевых панелей температурный коэффициент мощности обычно составляет  $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ , что означает снижение мощности на 0.4% при каждом увеличении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ .

В жарких климатах панели могут нагреваться до  $70^{\circ}\text{C}$  и выше, что снижает их КПД. Кремниевые панели более чувствительны к температуре, в то время как материалы, такие как перовскит, могут демонстрировать меньшую зависимость от температуры. Резкие температурные колебания могут вызвать механическое напряжение, приводящее к повреждениям и сокращению срока службы панелей.

Для повышения эффективности солнечных панелей в жарком климате используются различные системы охлаждения. Технологии, такие как теплоотводящие покрытия, активное охлаждение, а также пассивные системы с вентиляционными каналами и теплообменниками, помогают снизить температуру панелей, предотвратить перегрев и улучшить их производительность. Эти решения не только повышают эффективность, но и продлевают срок службы панелей, что особенно важно в условиях высоких температур [9]. На рис. 3 приложена вольт-амперная характеристика солнечного модуля при различных температурах среды.

#### *Влияние влажности на эффективность и производительность солнечных элементов*

Влажность оказывает определенное влияние на эффективность и производительность солнечных элементов. При повышенной влажности, особенно в сочетании с высокими тем-



**Рис. 2. Сравнение изменения тока и выходной мощности между чистыми и запыленными панелями [8].**

пературами, могут возникать проблемы с производительностью. Влага может воздействовать на солнечные панели, снижая их эффективность по нескольким причинам.

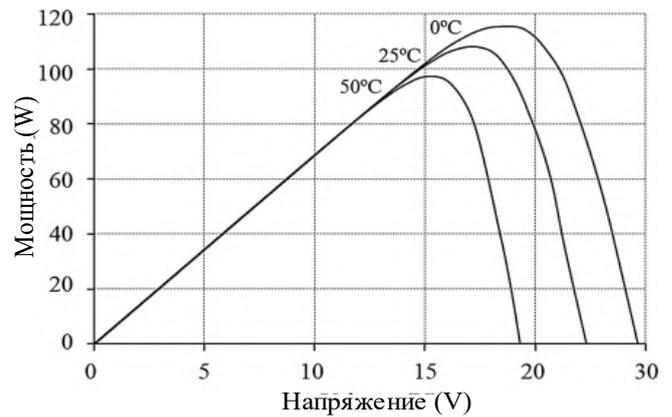
Во-первых, высокая влажность может привести к образованию конденсата на поверхности панели, что снижает её способность поглощать солнечное излучение. Влажная среда также способствует накоплению грязи и пыли, что ухудшает светопоглощение и снижает КПД солнечного модуля.

Кроме того, влажность может влиять на долговечность материалов, из которых изготовлены солнечные элементы. Вода может проникать в панели, особенно если они имеют повреждения или дефекты герметичности, что может привести к коррозии металлических частей и ухудшению проводимости. Это может привести к поломкам и снижению производительности солнечных элементов.

Тем не менее, солнечные элементы обычно проектируются с учетом воздействия внешней среды, и многие панели имеют защитные покрытия или герметичные корпуса, которые минимизируют влияние влаги. Однако в условиях высокой влажности необходимо регулярно проводить техническое обслуживание и проверку герметичности солнечных панелей для поддержания их долговечности, и эффективности [10].

### Эффект от расположения поверхностей фотоэлектрических модулей

Эффективность работы фотоэлектрических модулей зависит от их правильного расположения. Оптимальный угол наклона и ориентация



**Рис. 3. Влияние температуры на эффективность и производительность солнечного модуля**

относительно солнца обеспечивают максимальное поглощение солнечной энергии, что способствует высокой выработке электроэнергии. Панели, установленные под углом, могут более эффективно улавливать солнечное излучение, особенно если они следуют за движением солнца. Помимо этого, важными факторами, влияющими на эффективность, являются климатические условия, время года и затенение, которые могут снижать производительность модулей. Правильное размещение помогает минимизировать потери энергии и повысить общую эффективность солнечных систем [11].

Размещение фотоэлектрических модулей на крыше в несколько параллельных рядов помогает снизить влияние температурных факторов и других воздействий, повышая эксплуатационную эффективность.

Для максимизации эффективности работы фотоэлектрических модулей важно систематически изучать (рис. 4 и 5) тени и тщательно оценивать влияние их расположения.

Это поможет найти оптимальное размещение рядов, предотвращая взаимное блокирование модулей и обеспечивая более высокую выработку энергии.

На рис. 5 представлена характеристика влияния затенения солнечного модуля на его эффективность.

График иллюстрирует влияние частичного затенения одной ячейки солнечного модуля (СМ) на его вольт-амперную характеристику (ВАХ). По оси абсцисс отложено напряжение (В), а по оси ординат сила тока (А). Сплошная линия отображает ВАХ незатенённого модуля, где максимальная мощность достигается в



Рис. 4. Влияние затенения на работу фотоэлектрического элемента

определённой точке. Пунктирные линии показывают изменение характеристики при затенении одной ячейки на 25%, 50%, 75% и 110%.

По мере увеличения степени затенения наблюдается, существенное снижение выходного тока солнечного модуля, уменьшение напряжения на выходе, особенно в области точки максимальной мощности и резкий спад характеристики, связанный с переходом ячейки в режим шунтирования.

Эти изменения объясняются тем, что затенённая ячейка становится зоной с повышенным сопротивлением, ограничивающей работу всего модуля. В условиях сильного затенения могут возникать локальные перегревы (hot spots), что приводит к деградации фотоэлементов.

Данный график наглядно демонстрирует важность предотвращения затенения солнечных модулей, так как даже частичное перекрытие одной ячейки существенно снижает общую производительность системы.

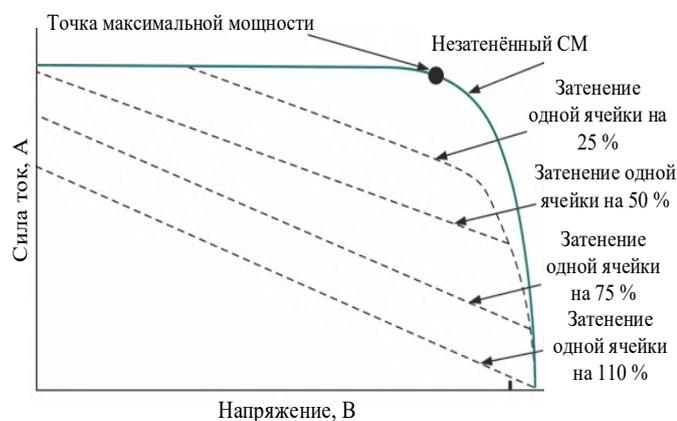


Рис. 5. Влияние частичного затенения солнечного модуля на его вольт-амперную характеристику

### Научная новизна исследования

В рамках проведённого комплексного анализа уточнены количественные зависимости влияния климатических факторов (запыленности, температуры, влажности, затенения) на энергетическую эффективность солнечных модулей.

Особенность работы заключается в сопоставлении экспериментальных данных с теоретическими моделями и результатами, представленными в современной научной литературе, с последующей адаптацией известных методов оптимизации к специфическим климатическим условиям.

Для характерных условий высокоаридных регионов проанализировано интегральное влияние мелкодисперсной пыли с размером частиц менее 50 мкм на снижение выходной мощности солнечных модулей, что позволило уточнить требования к мерам очистки и защите поверхностей.

Разработаны практические рекомендации по повышению эффективности фотоэлектрических систем за счёт применения пассивных и активных технологий охлаждения и методов минимизации запыления.

### Практическая значимость работы

Результаты исследования обладают высокой практической ценностью для эксплуатации фотоэлектрических систем в регионах с экстремальными климатическими условиями. Проведённый анализ позволяет разработать эффективные меры по минимизации влияния запыленности, высоких температур и влажности на выходную мощность солнечных модулей.

Рекомендации по оптимизации угла наклона панелей, использованию теплоотводящих покрытий, организации систем очистки и выбору методов защиты от влаги могут быть внедрены в эксплуатационную практику солнечных электростанций для повышения их надёжности, энергоэффективности и продления срока службы.

Полученные выводы могут быть использованы при проектировании новых солнечных энергоустановок, а также при модернизации действующих объектов в условиях повышенной запыленности и температурных нагрузок.

## Выводы

По результатам комплексного анализа факторов окружающей среды, влияющих на работу солнечных элементов, можно сделать следующие выводы:

1. Накопление пыли на поверхности солнечных элементов снижает выходную мощность до 25%, что подтверждается графическими данными. Рекомендуется регулярная очистка панелей для поддержания их эффективности.

2. Повышение температуры снижает КПД солнечных модулей на 0,4 %/°C, особенно в жарком климате. Предлагается использование пассивных (теплоотводящие покрытия) и активных (воздушное или водяное охлаждение) систем охлаждения.

3. Высокая влажность может вызывать деградацию материалов и коррозию токопроводящих контактов. Для предотвращения этих процессов рекомендуется применение защитных покрытий, герметизация соединений и контроль условий эксплуатации.

4. Оптимизация угла наклона панелей может снизить оседание пыли и увеличить эффективность поглощения солнечной энергии. Рекомендуется учитывать ориентацию и сезонные изменения угла наклона для повышения генерации.

5. Комплексное применение предложенных мер позволит повысить надёжность и эффективность фотоэлектрических систем в различных климатических условиях.

## Список литературы

1. Rahman M.M., Hasanuzzaman M., Rahim N.A. Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating in Malaysia // *Journal of Cleaner Production*. 2017. vol. 143. P. 912–924.

2. Кирпичникова, И.М. Сравнительный анализ генерации электрической энергии фотоэлектрическими модулями в различных температурных условиях / И.М. Кирпичникова, Д.А. Эвок, И.Б. Махсумов // *Электричество*. 2023. № 11. С. 34-41. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-11-34-41.

3. Махсумов, И.Б. Анализ производительности автономных солнечных электростанций с учётом экологических аспектов с применением программного пакета PVsyst в условиях южных регионов Республики Таджикистан / И.Б. Махсумов, А.Н. Давлатзода, М.Б. Холназаров // *Окружающая среда и энергоснабжение*. – 2025. – № 1(25). – С. 106-128. – DOI 10.24412/2658-6703-2025-1-106-128.

4. Махсумов, И.Б. Оценка эффективности использования солнечной энергии на территории Хатлонской области Республики Таджикистан / И.Б. Махсумов // *Окружающая среда и энергоснабжение*. 2024. № 1(21). С. 62-74. DOI: 10.24412/2658-6703-2024-1-62-74.

5. Udayakumar M.D., Subramaniam U., Rajesh A., Kumar A. The impact of advanced technological developments on solar PV value chain // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 2053-2058.

6. Srivastava R., Tiwari A.N., Giri V.K. An overview on performance of PV plants commissioned at different places in the world // *Energy for Sustainable Development*. 2020. Vol. 54. P. 51-59.

7. Кирпичникова, И.М. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов, В.В. Шестакова // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27, № 1. С. 83-93. DOI: 10.21285/1814-3520-2023-1-83-93.

8. Yang Z. A comprehensive analysis of environmental factors affecting solar cells: Dust accumulation, ambient temperature, and humidity // *Applied and Computational Engineering*. – 2023. – Т. 23. – С. 216-222.

9. Махсумов, И.Б. Влияние деградации и высокой температуры воздуха на энергетической эффективности солнечных модулей (литературный анализ) / И. Б. Махсумов // *Политехниче-*

ский вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 3(63). – С. 22-28.

10. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б., Сологубов А.Ю., Шестакова В.В. Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях // Энергоэффективность. Ценология. Экология и энергобезопасность: материалы научной конференции / под науч. ред. Л.Х. Зайнутдиновой, М.Г. Тягунова. Астрахань, 2020. С. 46-55.

11. Влияние тени на работу солнечных батарей [Электронный ресурс]. URL: <https://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej/> (дата обращения: 14.03.2025).

## References

1. Rahman M.M., Hasanuzzaman M., Rahim N. A. Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating in Malaysia // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 143. P. 912-924.

2. Kirpichnikova I.M., Evok D.A., Makhsumov I.B. [Comparative analysis of electric power generation by photovoltaic modules under different temperature conditions]. Electricity, 2023, no. 11, pp. 34-41. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-11-34-41. (in Russ.)

3. Makhsumov I.B., Davlatzoda A.N., Kholnazarov M.B. [Analysis of the Performance of Autonomous Solar Power Plants Taking into Account Environmental Aspects Using the Pvsyst Software Package in the Conditions of the Southern Regions of the Republic of Tajikistan]. Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2025, no. 1(25), pp. 106-128. DOI 10.24412/2658-6703-2025-1-106-128. (in Russ.)

4. Makhsumov I.B. [Assessment of solar energy utilisation efficiency in Khatlon Oblast of the

Republic of Tajikistan]. Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2024, no. 1(21), pp. 62-74. DOI: 10.24412/2658-6703-2024-1-62-74. (in Russ.)

5. Udayakumar M.D., Subramaniam U., Rajesh A., Kumar A. The impact of advanced technological developments on solar PV value chain // Materials Today: Proceedings, 2021, vol. 45, pp. 2053-2058.

6. Srivastava R., Tiwari A.N., Giri V.K. An overview on performance of PV plants commissioned at different places in the world // Energy for Sustainable Development, 2020, vol. 54, pp. 51-59.

7. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B., Shestakova V.V. [Reduced power generation efficiency of solar panels in dusty locations]. iPolytech Journal, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 83-93. DOI: 10.21285/1814-3520-2023-1-83-93. (in Russ.)

8. Yang Z. A comprehensive analysis of environmental factors affecting solar cells: Dust accumulation, ambient temperature, and humidity // Applied and Computational Engineering, 2023, vol. 23, pp. 216-222.

9. Makhsumov I.B. [Effect of degradation and high air temperature on the energy efficiency of solar modules (literature analysis)]. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research, 2023, no. 3(63), pp. 22-28. (in Russ.)

10. Kirpichnikova, I.M., Makhsumov I.B., Sologubov A.Y., Shestakova V.V. [Peculiarities of operation of solar power plants in different climatic conditions]. Energy efficiency. Cenology. Ecology and energy security: materials of the scientific conference / under the scientific editorship of L.H. Zainutdinova, M.G. Tyagunov. Astrakhan, 2020, pp. 46-55. (in Russ.)

11. Effect of shade on solar cell performance. – URL: <https://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej/> Available at: <http://www.utmn.ru/frgf/journal/htm> (accessed 14.03.2025).

## Сведения об авторе

**Махсумов Илхом Бурхонович** - кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой альтернативных источников энергии Таджикского энергетического института, [messi.neymar.suares@bk.ru](mailto:messi.neymar.suares@bk.ru).

## Турбомашины и поршневые двигатели

### АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР МАСЛА В ОПОРНОМ ПОДШИПНИКЕ ТУРБОАГРЕГАТА

- **Пшениснов Н.А.**, канд. техн. наук, ООО «Научно-производственное объединение ЭнергоСервис», Челябинск, Россия

### ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF OIL TEMPERATURES IN A SUPPORT BEARING TURBO UNIT

- **Pshenishnov N.A.**, Ph.D, Scientific and Production Association EnergoService LLC, Russia

Подшипники являются одними из важных деталей многих устройств, обеспечивающих их надежную, эффективную и бесперебойную работу. Для снижения износа на поверхности трения необходимо непрерывно подавать смазку под давлением. Важнейшим, но недооцененным фактором, влияющим на работу турбин (как паровых, так и газовых) и других механизмов, является состояние масла, особенно его «механическая» чистота (наличие твердых частиц). Экспериментальные исследования показывают, что коэффициент трения в подшипниках существенно изменяется даже при низких концентрациях твердых частиц. В результате увеличения силы трения значительно повышается температура подшипника, что в свою очередь влияет на вязкость смазки и, следовательно, сильно воздействует на характеристики подшипников. Согласно статистическим данным около 20-25% всех вынужденных простоев турбоагрегатов на электростанциях происходит вследствие выхода из строя (отказа) подшипников, причем доля неисправностей опор скольжения, обусловленная загрязнением смазочного материала, составляет 50-55%. Из-за неисправностей элементов маслосистемы происходит до 10% всех отказов турбоагрегатов. Система маслоснабжения обеспечивает смазку и охлаждение подшипников турбоагрегата и других трущихся деталей. В большинстве случаев система смазки подшипников совмещается с системой подачи масла в элементы регулирования турбины. Непрерывная подача смазки в виде органических и синтетических масел – гарантия надежной работы подшипников турбоагрегата. Проанализировано течение и нагрев масла в опорном подшипнике паровой турбины. Для достижения поставленной цели была построена геометрическая модель подшипника, описана математическая модель для расчета режима работы и заданы граничные условия. Представлено распределение температуры масла в подшипнике.

**Ключевые слова:** течение масла, паровые турбины, опорный подшипник, турбинное масло.

Bearings are one of the important parts of many devices, ensuring their reliable, efficient and uninterrupted operation. To reduce wear on the friction surface, it is necessary to continuously supply lubricant under pressure. The most important, but underestimated factor affecting the operation of turbines (both steam and gas) and other mechanisms is the condition of the oil, especially its “mechanical” cleanliness (presence of solid particles). Experimental studies show that the coefficient of friction in bearings changes significantly even at low concentrations of solid particles. As a result of the increased frictional force, the bearing temperature increases significantly, which in turn affects

the viscosity of the lubricant and therefore greatly affects the bearing performance. According to statistics, about 20-25% of all forced downtime of turbine units at power plants occurs due to failure of bearings, and the share of sliding bearing failures due to contamination of the lubricant is 50-55%. Due to malfunctions of oil system elements, up to 10% of all turbounit failures occur. The oil supply system provides lubrication and cooling of the turbine unit bearings and other rubbing parts. In most cases, the bearing lubrication system is combined with an oil supply system to the turbine control elements. A continuous supply of lubricant in the form of organic and synthetic oils guarantees reliable operation of the turbine unit bearings. The flow and heating of oil in the support bearing of a steam turbine are analyzed. To achieve this goal, a geometric model of the bearing was built, a mathematical model for calculating the operating mode was described, and boundary conditions were specified. The distribution of oil temperature in the bearing is presented.

**Key words:** oil flow, steam turbines, thrust bearing, turbine oil.

## Введение

Подшипник представляет собой сборочный узел, который является частью вращающихся осей и валов. Подшипники предназначены для восприятия осевых и радиальных нагрузок, которые прикладываются к валу, и передают данные нагрузки на корпус устройства [1].

Экспериментальные исследования показывают, что коэффициент трения в подшипниках существенно изменяется даже при низких концентрациях твердых частиц. В результате увеличения силы трения значительно повышается температура подшипника, что в свою очередь влияет на вязкость смазки [2, 3].

В турбинной установке используются опорные подшипники для снижения износа вала турбины вследствие создания масляной пленки между шейкой вала и вкладышем подшипника. Опорные подшипники турбин делятся на жесткие и самоустанавливающиеся, исходя из наличия соответственно цилиндрических и шариковых подшипников.

Для его эффективной работы и охлаждения масло должно постоянно подаваться в подшипники под давлением. Масло подается через входной патрубок с самым низким давлением и затягивается в нижний вкладыш подшипника. Обеспечение равномерного распределения масла достигается путем подачи масла в середину гильзы, которое в дальнейшем распределяется по валу турбины в разных направлениях. Отработавшее масло нагревается и отводится с обоих концов нижней гильзы.

Для опорных подшипников с малыми ради-

альными зазорами, например сегментных, работа в условиях полусухого трения, даже при баббитовой заливке, недопустима из-за ее быстрого износа. Поэтому под шейки вала через отверстие в нижней половине вкладыша подается масло под большим давлением, в результате чего происходит всплытие вала на 40-60 мкм при трогании вала и малой частоте вращения.

Простая конструкция масляных опорных подшипников делает их использование более доступным и менее затратным для обслуживания. Их дальнейшее изучение позволит развивать конструкцию, делать ее более надежной и стабильной.

Экспериментальные исследования показывают, что коэффициент трения в подшипниках существенно изменяется даже при низких концентрациях твердых частиц. В результате увеличения силы трения значительно повышается температура подшипника, что в свою очередь влияет на вязкость смазки [2, 3].

Цель статьи – получение гидродинамической картины и поля температур масла, распределяющегося во вкладыше подшипника, близких к значениям, полученных на практике, для изучения и дальнейшего усовершенствования конструкции.

Для достижения цели исследования необходимо выполнить следующие задачи: построение геометрической модели в программе Ansys внутренней части опорного подшипника с учетом вала турбины и входного и выходного отверстия для подачи и отвода масла; определение граничных условий проведения исследования; задача математических моделей и уравнений, описывающих исследуемую модель (модель движения жидкости).

## Метод моделирования температурных полей турбинного масла в подшипнике

Процесс моделирования, использованный в этом исследовании, основан на методах конечных элементов (МКЭ). МКЭ обеспечивает в значительной степени автоматизированный подход к вычислению поведения механических систем.

Цель вычисления состоит в том, чтобы разделить модель на отдельные компоненты, соединенные в узлах. При таком подходе значения переменной поля находятся в узлах с использованием граничных условий. Затем рассчитанные значения используются для оценки значений в неузловых точках посредством интерполяции значений в узлах [2].

Для описания модели движения жидкости используется метод Эйлера. Данный метод изучает поля векторных или скалярных величин и не учитывает движение каждой отдельно взятой частицы [3].

Движение жидкости определяется функциями, демонстрирующими преобразования скоростей в точках определенной фиксированной области, выбранной из потока. В определенный момент в каждой точке этой области, представленной координатами:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , находится частица со скоростью. Эта скорость называется мгновенной местной скоростью. Набор мгновенных локальных скоростей создает векторное поле, известное как поле скоростей. Как правило, он может меняться во времени и в координатах:

$$\bar{u} = u_x \bar{i} + u_y \bar{j} + u_z \bar{k}; \quad (1)$$

где

$$u_x = u_x(x, y, z, t); \quad (2)$$

$$u_y = u_y(x, y, z, t); \quad (3)$$

$$u_z = u_z(x, y, z, t). \quad (4)$$

Переменные  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$  – переменные Эйлера.

Ускорение жидкой частицы в проекциях на оси координат:

$$\frac{du_x}{dt}, \frac{du_y}{dt}, \frac{du_z}{dt} \quad (5)$$

Полный дифференциал функции нескольких переменных

$$du_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} dt + \frac{\partial u_x}{\partial x} dx + \frac{\partial u_x}{\partial y} dy + \frac{\partial u_x}{\partial z} dz. \quad (6)$$

Предположим, что  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  являются проекциями элементарного перемещения  $ds$  жидкой частицы на оси координат. Тогда:

$$\frac{dx}{dt} = u_x, \quad \frac{dy}{dt} = u_y, \quad \frac{dz}{dt} = u_z \quad (7)$$

Полное ускорение по времени в проекции на оси:

$$\begin{cases} \frac{du_x}{dt} = \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial u_x}{\partial x} u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y} u_y + \frac{\partial u_x}{\partial z} u_z \\ \frac{du_y}{dt} = \frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{\partial u_y}{\partial x} u_x + \frac{\partial u_y}{\partial y} u_y + \frac{\partial u_y}{\partial z} u_z \\ \frac{du_z}{dt} = \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial u_z}{\partial x} u_x + \frac{\partial u_z}{\partial y} u_y + \frac{\partial u_z}{\partial z} u_z \end{cases} \quad (8)$$

где первые слагаемые – локальная производная скорости (локальное ускорение); трехчленная сумма – конвективная производная скорости (конвективное ускорение)

Конвективное ускорение определяет ускорение частицы при изменении положения данной частицы в поле скоростей [3].

Для того, чтобы рассчитать плотность теплового потока, необходимо рассчитать коэффициент теплоотдачи от поверхности стенки вкладыша подшипника [4].

Находим число Рейнольдса для масла.

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{\text{экв}}}{\nu} \quad (9)$$

где  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр входного отверстия ( $d_{\text{экв}} = 0,053$  м);  $\omega$  – скорость потока масла на входе ( $\omega = 2$  м/с);  $\nu$  – кинематическая вязкость масла ( $\nu = 23 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с).

Движение потока на входе турбулентное ( $Re = 4608$ ).

Находим число Нуссельта:

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} (Pr_1)^{0,43} \left( \frac{Pr_1}{Pr_2} \right)^{0,25} \quad (10)$$

где  $Pr_1$  – число Прандтля при температуре  $t_m$  ( $Pr_1 = 487$ );  $Pr_2$  – число Прандтля при температуре  $t_{cm}$  ( $Pr_2 = 203$ ).

Находим коэффициент теплообмена при  $Nu=43$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_m}{d_{э\kappa\beta}} \quad (11)$$

где  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности ( $\lambda_m = 13,14$  Вт/м·К).

Используя полученное значение коэффициента теплоотдачи ( $\alpha=10716$  Вт/м<sup>2</sup>·К), определим плотность теплового потока по формуле

$$q = \alpha(t_{cm} - t_m) \quad (12)$$

где  $t_{cm}$  – температура стенки ( $t_{cm} = 115$  °С);  $t_m$  – температура масла на выходе ( $t_m = 60$  °С).

Плотность теплового потока будет равна 589,386 кВт/м<sup>2</sup>.

## Материалы

В ходе моделирования процесса в программе ANSYS Fluent используется модель SST k- $\omega$  (Модель Ментера) (+2E) – эта модель является продвинутой версией модели k- $\omega$ , учитывает переходы в турбулентность и затухание турбулентности. Пристеночные функции не используются [5].

Система k- $\omega$  SST состоит из двух дифференциальных уравнений, сопровождаемых минимум 10 константами, которые необходимо учитывать при ее использовании. Кроме того, необходимо учитывать и другие логические и функциональные связи. Хотя метод RANS и стандартные модели турбулентности не могут быть использованы для точного моделирования крупномасштабной турбулентности, численные эксперименты показали, что для практических инженерных целей эту комбинацию можно использовать для определения параметров вихревого следа.

Уравнение турбулентной кинетической энергии и скорости диссипации турбулентности:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (13)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (14)$$

где константы  $\alpha_1 = 0,55$ ;  $\alpha_2 = 0,44$ ;  $\beta_1 = 0,075$ ;  $\beta_2 = 0,828$ ;  $\beta^* = 0,09$ ;  $\sigma_{k1} = 0,5$ ;  $\sigma_{k2} = 1$ ;  $\sigma_{\omega 1} = 0,5$ ;  $\sigma_{\omega 2} = 0,856$ , а также коэффициенты замыкания и вспомогательные соотношения:

$$CD_{k\omega} = \max(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10}) \quad (15)$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \quad (16)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \right\} \quad (17)$$

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (18)$$

$$P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right) \quad (19)$$

Рассмотрим созданную модель внутренней части опорного подшипника (рисунок 1).

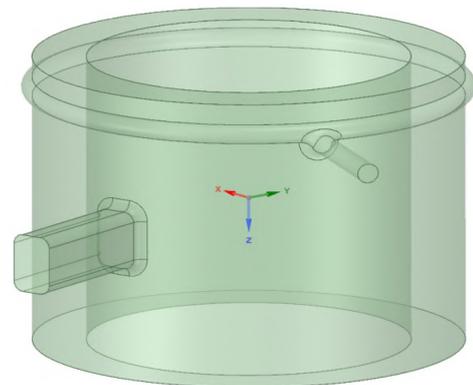


Рис. 1. Геометрическая модель опорного подшипника

Общая площадь поверхности элемента  $F = 0,372 \text{ м}^2$ . Диаметр подшипника – 0,4 м, диаметр вала – 0,3 м. В модели предусмотрены входное и выходное отверстия.

Во входное отверстие прямоугольного сечения с поперечным сечением площадью  $F_{\text{вх}} = 0,0024 \text{ м}^2$  подается масло марки ОМТИ температурой  $40^\circ\text{C}$  со скоростью 2 м/с.

Масло, которое нагревается в результате жидкостного трения масло о вращающийся вал турбины, удаляется из подшипника через выходное отверстие круглого сечения площадью  $F_{\text{вых}} = 0,063 \text{ м}^2$ .

Разбивочная сеть состоит из 951559 узлов и 5361456 элементов (рисунок 2).

## Результаты моделирования

Моделирование процесса системы подачи масла во вкладыш подшипника позволило получить картину распределения температур по области (рис.3). Получены поле температур на оси выхода масла (рис. 3), поле температур на оси входа масла (рис. 4), график перераспределения температуры на оси выхода масла до конца всей площади модели (рис. 5).

На рисунке 4 показан градиент температуры по сечению модели на оси входа масла. На входе масло имеет турбулентный поток и высокую скорость. Благодаря этому поток ударяется о стенку подшипника и создает вихревые потоки масла, что позволяет температуре распределяться по площади вкладыша более эффективно.

По графику на рисунке 5 видно, что температура от края к центру понижается, так как в центр бьет поток ещё не нагретого масла, а к краям она снова нагревается.

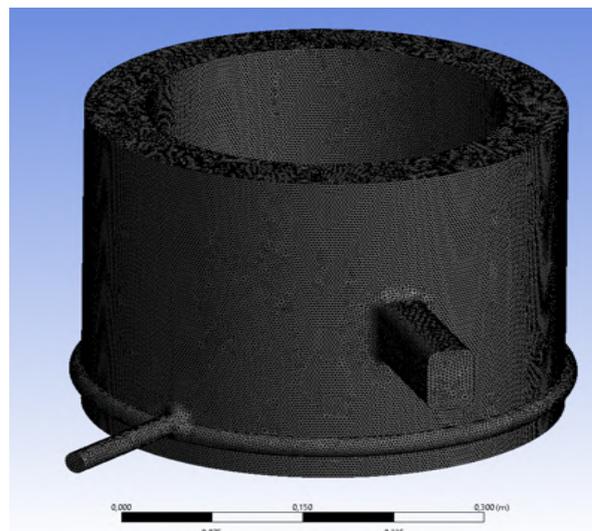


Рис. 2. Сетка модели

## Выводы

1. В результате исследования была построена геометрическая модель опорного подшипника турбоагрегата в программе ANSYS Fluent.

2. После операционализации модели были определены гидродинамическая картина и поле температур, а также графики изменения температуры в плоскости подшипника.

3. Температура от края к центру понижается, так как в центр бьет поток ещё не нагретого масла, а к краям конца она снова нагревается.

## Список литературы

1. В. В. Длоугий, Т. И. Муха, А. П. Цупиков, Б. В. Януш; Под общ. ред. В. В. Длоугого. Приводы машин: Справочник. - 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. - 383 с.

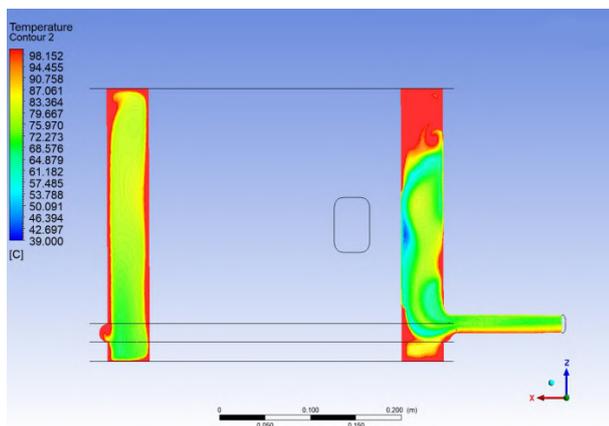


Рис. 3. Поле температур на оси выхода масла

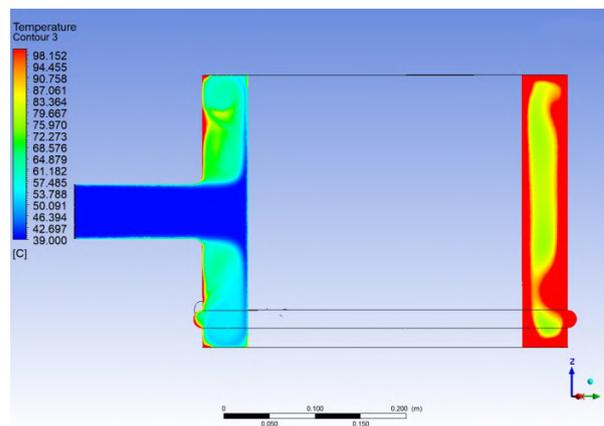
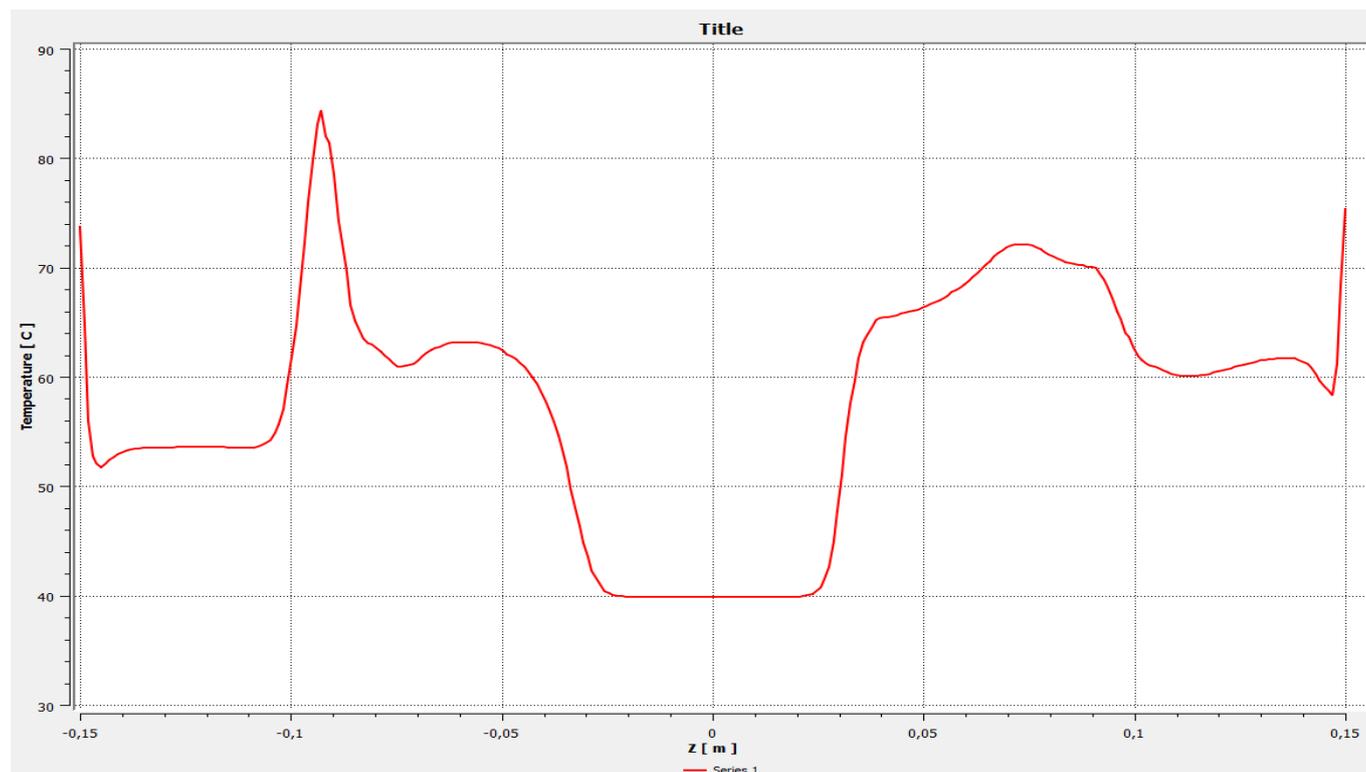


Рис. 4. Поле температур на оси входа масла



**Рис. 5. График перераспределения температуры на оси Z**

2.А. О. Шимановский, А. В. Путьто. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики. Основные понятия и определения. Общая схема метода конечных элементов — Гомель. БелГУТ, 2008. - 61 с.

3.А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева. Численные методы решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений: учеб.пособие — Томск : СТТ, 2016. - 44 с.

4.М.А. Михеев, И. М. Михеева. Основы теплопередачи – М: «Энергия», 1977. – 344 с.

5.Г.Г. Черный, С.А. Лосев. Физико-химические процессы в газовой динамике. Справочник, Том 2: Физико-химическая кинетика и термодинамика. – М.: Научно-издательский центр механики, 2002. – 368 с.

2. A. O. Shimanovsky, A. V. Putyato. Application of the finite element method in solving problems of applied mechanics. Basic concepts and definitions. The general scheme of the finite element method - Gomel. BelSUT, 2008. - 61 p.

3. A.Yu. Krainov, K.M. Moiseev. Numerical methods for solving boundary value problems for ordinary differential equations: study guide - Tomsk: STT, 2016. - 44 p.

4. M.A. Mikheev, I. M. Mikheeva. Fundamentals of heat transfer - M: «Energy», 1977. - 344 p.

5. G.G. Chyorny, S.A. Losev. Physical and chemical processes in gas dynamics. Handbook, Volume 2: Physico-chemical kinetics and thermodynamics. - M.: Scientific Publishing Center of Mechanics, 2002. - 368 p.

## References

1. V. V. Dlougy, T. I. Mukha, A. P. Tsupikov, and B. V. Yanush; Under total ed. V. V. Dlougogo. Machine drives: Handbook - 2nd ed., Revised. and additional - L.: Engineering, Leningrad. department, 1982. - 383 p.

## Сведения об авторе

**Пшениснoв Никита Анатольевич** - кандидат технических наук, директор ООО «Научно-производственное объединение ЭнергоСервис», [enserv@mail.ru](mailto:enserv@mail.ru).

**Краткие сообщения. Успехи в области энергетики и турбомашиностроения****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПАРОГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОТВОРНОСТИ НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ**

- **Шайдуллаев Р. Б.**, канд. техн. наук, Институт природных ресурсов южного отделения Национальной академии наук КР, г. Ош, Кыргызская республика
- **Токтоназаров С.Т.**, Институт природных ресурсов южного отделения Национальной академии наук КР, г. Ош, Кыргызская республика
- **Омуров Ж.К.**, Институт природных ресурсов южного отделения Национальной академии наук КР, г. Ош, Кыргызская республика

**EXPERIMENTAL STEAM GENERATOR UNIT FOR ENRICHMENT OF LOW-GRADE COALS**

- **Shaidullaev R.B.**, PhD, IPR SB NAS KR, Osh, Kyrgyz republic
- **Toktonazarov S.T.**, IPR SB NAS KR, Osh, Kyrgyz republic
- **Omurov Zh.K.**, IPR SB NAS KR, Osh, Kyrgyz republic

Предметом исследования является экспериментальная парогенераторная установка для обогащения углей. Цель исследования – создание парогенераторной установки для повышения теплотворности низкосортных углей и ее применение в энергетике. С помощью предлагаемой парогенераторной установки достигается получение смеси горючих газов, которого можно использовать в качестве катализатора при сжигании низкосортных углей со снижением негорючих летучих. Установка может применяться в промышленности. Научная значимость установки состоит в повышении теплотворности сжигаемых низкосортных кыргызских углей, возможности использования обогащенных углей в промышленности. С методологической точки зрения в статье применяется термохимический способ, методы пиролиза и катализа. Практическая значимость результатов исследований заключается в сжигании ранее широко не использовавшихся в промышленности углей, усилении экономического потенциала Кыргызстана.

**Ключевые слова:** парогенераторная установка, вода, низкосортный уголь, сжигание углей, энергетический сектор.

The subject of the study is an experimental steam generator unit for coal enrichment. The purpose of the study is to create a steam generator unit for increasing the calorific value of low-grade coals and its application in power engineering. With the help of the proposed steam generator unit, a mixture of combustible gases is obtained, which can be used as a catalyst in the combustion of low-grade coals with a decrease in non-combustible volatiles. The unit can be used in industry. The scientific significance of the installation is to increase the calorific value of low-grade Kyrgyz coals, and the possibility of using enriched coals in industry. From a methodological point of view, the article uses a thermochemical method, pyrolysis and catalysis methods. The practical significance of the research results is to burn coals that were not previously widely used in industry, and to strengthen the economic potential of Kyrgyzstan.

**Key words:** steam generator installation, water, low-grade coal, coal combustion, energy sector.

## Введение

Парогенераторы используются в промышленности и на ТЭЦ для генерации пара (повышения теплотворности угля). Принцип работы следующий: жидкость нагревается при сжигании низкосортного топлива: древесины, уголь, нефть, природный газ, смеси газов.

Одним из наиболее эффективных способов с точки зрения теплотворной способности является природный газ, однако в Кыргызской Республике природный газ закупается – является импортом и дорогостоящим энергоресурсом. В тоже время Республика обладает богатыми запасами угля, прежде всего, бурого. Часть этого угля сжигается на ТЭЦ г. Бишкек, остальная на городских и районных котельных. Примечательно, что домохозяйства также используют уголь как основное топливо.

Таким образом, исследование свойств синтез-газа является актуальным в науке и технике.

Цель исследования – создание парогенераторной установки для повышения теплотворности низкосортных углей и ее применение в энергетике. С помощью предлагаемой парогенераторной установки достигается получение смеси горючих газов, которые можно использовать в качестве катализатора при сжигании низкосортных углей со снижением негорючих летучих. Установка может применяться в промышленности.

Научная значимость установки состоит в повышении теплотворности сжигаемых низкосортных кыргызских углей, возможности использования обогащенных углей в промышленности.

С методологической точки зрения в статье применяется термохимический способ, методы пиролиза и катализа.

Практическая значимость результатов исследований заключается в сжигании ранее широко не использовавшихся в промышленности углей, усилении экономического потенциала Кыргызстана.

## Методика работы установки

Авторами работы предлагается парогенераторная установка, которая применяется для улучшения качества сжигаемого топлива. Для этого в топку печи монтируется парогенератор, а горячее в топке топливо (уголь), создает при взаимодействии с воздухом химические реакции и выделяет теплоту, которая приводит к испарению

воды в парогенераторе. Далее полученный водяной пар перегревается и под давлением подается через форсунку в сопло. Перегретый водяной пар подается в горящее топливо, образуя водяной газ - смесь оксида углерода  $\text{CO}_2$  и водорода  $\text{H}_2$  и выходит из сопла в виде высокотемпературного факела. Водяной газ получают продуванием водяного пара сквозь слой раскаленного угля. В таком термохимическом процессе водяной пар переходит в насыщенный пар и одновременно молекулы воды распадаются частично на кислород и водород. После чего  $\text{CO}_2$  распадается на  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ , далее образуется синтез-газ ( $\text{CO}+\text{H}_2$ ). Благодаря сжиганию летучих веществ из состава низкосортных углей достигается выход «очищенных» остатков горючих веществ, которые не вредны для окружающей среды. Состав синтез-газа:  $\text{CO} - 44\%$ ;  $\text{N}_2 - 6\%$ ;  $\text{CO}_2 - 5\%$ ;  $\text{H}_2 - 45\%$ .

## Схема экспериментального стенда

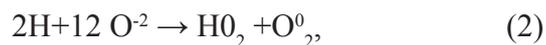
Разработан вариант парогенераторной установки, рис.1. Установка состоит из следующих элементов: 1 - емкость для воды, 2 - крышка заливочной горловины, 3 - обратный клапан давления, 4 - трубка для отвода воздуха, 5 - регулированный кран для воды, 6 - жиклер, 7 - камера нагрева, 8 – манометр, схема соединения показана на рис. 1.

## Химические реакции

Полученные вещества образуются в ходе химических реакций:

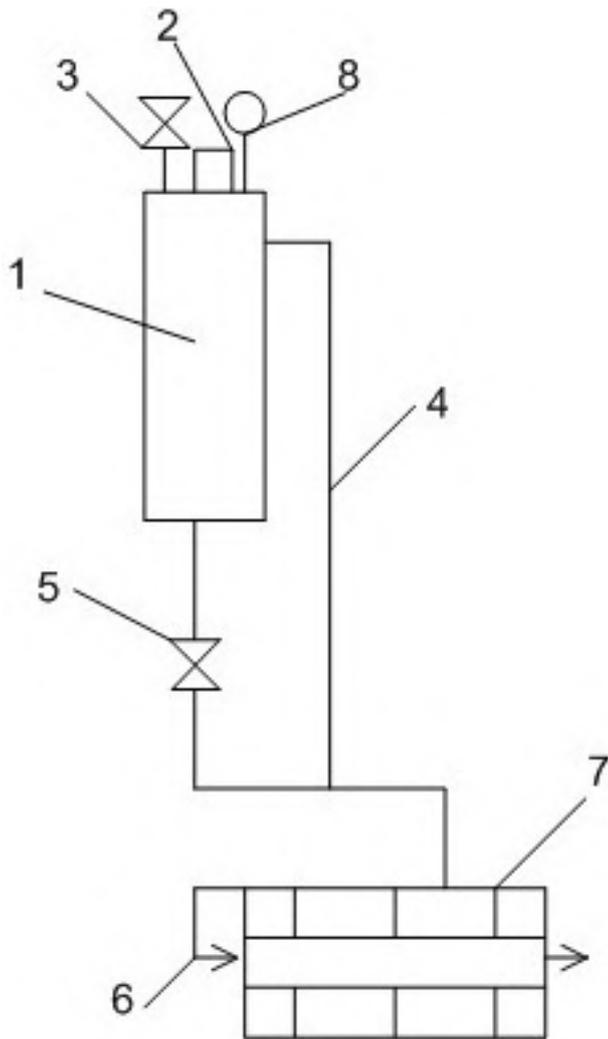


При температуре свыше  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  молекул воды разлагается на атомы водорода и кислорода, оба атома водорода и кислорода не имеют заряды, значить их атомный заряд равно нулю.



Обработка результатов исследования. Полученный в лабораторных условиях синтез-газ получен в соотношениях веществ:  $\text{CO} - 44\%$ ;  $\text{N}_2 - 6\%$ ;  $\text{CO}_2 - 5\%$ ;  $\text{H}_2 - 45\%$ .

Результаты согласуются с некоторыми работами авторов в области пиролиза, катализа и других вариантов использования низкосортных углей.



**Рис. 1. Парогенераторная установка**

1 - емкость для воды, 2 - крышка заливочной горловины, 3 - обратный клапан давления, 4 - трубка для отвода воздуха, 5 - регулированный кран для воды, 6 - жиклер, 7 - камера нагрева, 8 - манометр

## Перспективы использования результатов в промышленности

Синтез-газ – это конечный или промежуточный продукт обогащения бурых углей, который следует использовать для негазифицированных домохозяйств.

Кроме того, при полученном составе синтез-газа, следует обратить внимание на возможности промышленного использования. В первую очередь, это котельные на месторождениях или вблизи угольных разрезов и шахт.

Для использования полученного синтез-газа на ТЭЦ следует проводить дополнительные исследования.

## Выводы

1. Разработан лабораторный стенд для получения синтез-газа, отличающийся тем, что использует низкосортные кыргызские бурые угли.

2. Разработанная методика проведения эксперимента может быть масштабирована для ТЭЦ и котельных.

3. Состав синтез-газа не отличается от состава ранее полученных в мире, таким образом, подтверждается теория об использовании местных углей в качестве низкосортного топлива, которое следует обогащать и сжигать на котельных и теплоэлектростанциях.

## Список литературы

1. Усмонов, Н. О. Особенности использования парогазовых установок на ТЭС / Н. О. Усмонов, Ф. Ш. Умарджанова // Молодой ученый. — 2016. — № 11 (115). — С. 518-522.

2. Зайченко, В. М. Метод и устройство пиролизической переработки отходов целлюлозно-бумажного производства в высококачественный синтез-газ / В. М. Зайченко, К. О. Крысанова, В. А. Лавренов // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 11. – С. 4-9. – DOI 10.18412/1816-0395-2018-11-4-9.

3. Численное моделирование окислительной конверсии метана в синтез-газ в реакторе с обратимым потоком / С. С. Костенко, А. Н. Иванова, А. А. Карнаух, Е. В. Полианчик // Химическая физика. – 2024. – Т. 43, № 8. – С. 49-61. – DOI 10.31857/S0207401X24080065.

4. Влияние добавок водяного пара на процесс матричной конверсии метана в синтез-газ / А. В. Никитин, А. В. Озерский, К. А. Тимофеев [и др.] // Горение и взрыв. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 18-23. – DOI 10.30826/CE18110203.

## References

1. Usmonov N.O., Umarjanova F.Sh. [Features of the Use of Combined-Cycle Plants at Thermal Power Plants]. Young Scientist, 2016, no. (11) 115, pp. 518-522 (in Russ.).

2. Zaychenko V.M., Krysanova K.O., Lavrenov V.A. Method and Device for Pyrolytic Processing of Pulp and Paper Production Waste into High-Quality Synthesis Gas [Ecology and Industry of Russia], 2018, Vol. 22, no. 11, pp. 4-9.

3. Kostenko S.S., Ivanova A.N., Karnaukh A.A., Polianchik E.V. [Numerical Modeling of Oxidative Conversion of Methane into Synthesis Gas in a Reversible Flow Reactor], Chemical Physics, 2024, Vol. 43, no. 8, pp. 49-61. - DOI 10.31857/S0207401X24080065.

4. Nikitin A.V., Ozersky A.V., Timofeev K.A. [et al.] [Effect of Water Vapor Additives on the Process of Matrix Conversion of Methane into Synthesis Gas], Combustion and Explosion, 2018, Vol. 11, no. 2, pp. 18-23. - DOI 10.30826/CE18110203.

### Сведения об авторах

**Шайдуллаев Расулбек Бегимкулович** - кандидат технических наук, с.н.с., зав. лаб. «Газификация угля» Института природных ресурсов южного отделения Национальной академии наук КР (ИПР ЮО НАН КР), shrb63@mail.ru.

**Токтоназаров Садыкбек Токтоназарович**. - с.н.с., зав. научно-производственный центр НПЦ «Технолог» Институт природных ресурсов южного отделения Национальной академии наук КР (ИПР ЮО НАН КР), sad.tok52@mail.ru.

**Омуров Жетимиш Кочунович** - н.с., лаб. «Газификация угля» Институт природных ресурсов южного отделения Национальной академии наук КР ИПР ЮО НАН КР, omurov58@mail.ru.

## СОХРАНЕНИЕ АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ЗДАНИЙ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- **Чжу Синьюй**, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия
- **Биань Ивэнь**, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия
- **Лю Чан**, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия

## PRESERVING THE ARCHITECTURAL HERITAGE OF BUILDINGS WHEN INTEGRATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

- **Zhu Xinyu**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation
- **Bian Yiwen**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation
- **Liu Chang**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Рассмотрена технология BIPV-интеграции фотоэлектрических модулей в архитектуру зданий, имеющих историческое и культурное значение, проведен анализ фотоэлектрических модулей и рекомендован наиболее эффективный вид для энергообеспечения. В результате проведения анализа выявлено, что современные фотоэлектрические модули могут быть выполнены в различных формах, размерах и цветах, это позволяет архитекторам органично вписывать их в дизайн зданий, руководствуясь архитектурной эстетикой.

**Ключевые слова:** архитектурное наследие, фотоэлектрические модули, BIPV - технологии, интеграция.

The technology of BIPV integration of photovoltaic modules into the architecture of buildings of historical and cultural significance is considered, an analysis of photovoltaic modules is conducted and the most efficient type for energy supply is recommended. As a result of the analysis, it was revealed that modern photovoltaic modules can be made in various shapes, sizes and colors, which allow architects to organically fit them into the design of buildings, guided by architectural aesthetics.

**Key words:** architectural heritage, photovoltaic modules, BIPV technologies, integration.

### Введение

Сегодня мир обладает множеством ценных архитектурных памятников, представляющих культурное наследие человечества — от древних сооружений до промышленных и современных построек. Их сохранение требует постоянного совершенствования методов консервации, особенно учитывая стремительное развитие технологий и изменение общественных приоритетов.

Одним из перспективных направлений является сочетание интегрированных фотоэлектрических систем с задачей охраны исторического

облика зданий. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью защиты внешнего вида старинных строений одновременно с эффективным использованием возобновляемой энергии в условиях современного экологического курса.

Интеграция фотоэлектрических панелей в архитектуру зданий — это процесс включения солнечных батарей непосредственно в элементы конструкции здания для генерации электроэнергии от солнечного света. Этот подход позволяет сочетать эстетические и функциональные аспекты архитектуры с экологическими целями устойчивого развития [1,2].

## Основная часть

В статье рассмотрен вариант BIPV (Building Integrated Photovoltaics) интеграции солнечных панелей непосредственно в конструкцию здания, заменяя традиционные строительные материалы. Солнечные панели становятся частью здания, обеспечивая энергоснабжение, теплоизоляцию, защиту от шума и светопропускаемость. Использование такого типа интеграции имеет ряд преимуществ.

Прежде всего это его энергоэффективность, так как встраивание фотоэлектрических модулей позволяет зданию генерировать электроэнергию на месте, снижая зависимость от внешних источников энергии и способствуя устойчивому развитию городской среды. Поскольку солнечные батареи становятся частью самой структуры здания, нет необходимости выделять дополнительные площади под их установку и следовательно, экономится пространство.

Современные фотоэлектрические модули могут быть выполнены в различных формах, размерах и цветах, что позволяет архитекторам органично вписывать их в дизайн зданий, руководствуясь архитектурной эстетикой. Кроме того, замена традиционных строительных материалов на фотоэлектрические панели может снизить общие затраты на отделку фасада или кровли. Пример применения такой технологии приведен на рис. 1.

Культурный центр Цзянсинюй Западного сада Шаньшуй — один из уникальных культурных объектов Китая, расположенный недалеко от города Чэнду провинции Сычуань. Этот комплекс сочетает элементы традиционной китайской архитектуры и садово-паркового искусства шаньшуй («горы и вода»), создавая гармоничное пространство для культурного отдыха и духовного развития посетителей.

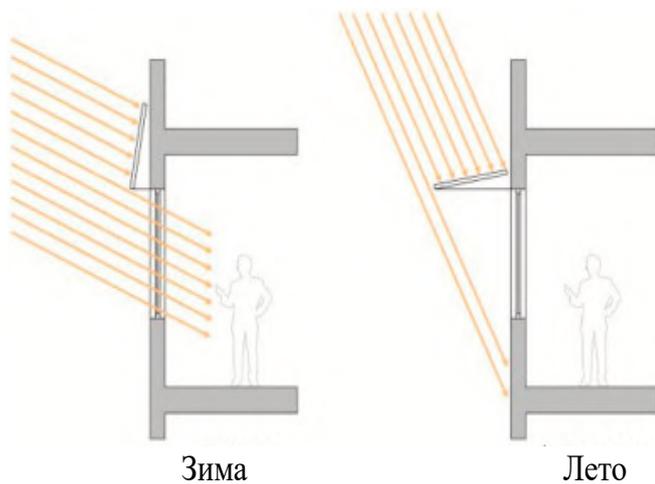
Центр начал свою историю около трех десятилетий назад, первоначально являясь небольшим парком, посвященным традициям чайных церемоний и чайной культуры региона Сычуань. Постепенно парк расширялся, включая новые павильоны, галереи, музеи и другие объекты, объединяя традиционные китайские архитектурные стили и современные дизайнерские решения. Именно такие решения, как использование фотоэлектрических модулей на кровле здания обеспечивают не только надежное и качественное электроснабжение, но и придают комплексу необычный вид, сохраняя необходимые функции помещений и традиционные архитектурные решения.

Солнечная энергия, которая является основным источником, используется для получения электроэнергии и горячего водоснабжения.

Для обеспечения температурного режима зданий необходимо предусмотреть поступление солнечной энергии внутрь помещений в разное время года.



Рис. 1. Культурный центр Цзянсинюй Западного сада Шаньшуй (КНР) [3]



**Рис. 2. Принцип сезонной работы подвижного устройства для затенения солнечных батарей.**

Для этого могут быть использованы фотоэлектрические модули, которые не только вырабатывают электроэнергию, но и служат затеняющим устройством на южной стороне здания (рис.2). Такое решение помогает снизить тепловую нагрузку на здание, при увеличении выработки электроэнергии на 2% [4].

Такие устройства являются подвижными, что позволяет управлять естественным освещением

и оптимизировать работу фотоэлектрических модулей в разные периоды года.

Объекты архитектурного наследия в отличие от обычных зданий, требуют бережного отношения к строениям и строгого соблюдения исторических функций. Для этого необходимо использовать фотоэлектрические модули, которые бы соответствовали этим требованиям.

Проанализированы характеристики фотоэлектрических модулей, которые могут быть использованы для технологии BIPV, результаты анализа показаны в таблице 1.

## Результаты анализа и обсуждение

На основе данных анализа были рекомендованы наиболее целесообразные для BIPV-систем фотоэлектрические модули. Выбор типа фотоэлектрических панелей зависит от конкретных задач проекта, бюджета, архитектурных требований и ожидаемой эффективности.

При использовании BIPV-технологии для зданий, имеющих историческую ценность, предпочтение лучше отдавать тонким пленочным панелям, OPV и перовскитным технологиям, так как они легко интегрируются в архитектуру и могут принимать разнообразные формы.

**Таблица 1 – Характеристики фотоэлектрических модулей**

Тип ФЭМ	Характеристика	Применение
<b>Монокристаллические кремниевые модули</b>	Изготовлены из одного кристалла чистого кремния. Обладают высоким КПД (около 20%) и долговечностью.	Используются в обеих системах BIPV типа, особенно популярны в проектах, где требуется высокая эффективность и длительный срок службы
<b>Поликристаллические кремниевые модули</b>	Производятся из множества мелких кристаллов кремния. Имеют чуть меньший КПД (15-18%), но стоят дешевле монокристаллических аналогов.	Могут использоваться и в BIPV, особенно в бюджетных проектах, а также в системах, где важны баланс цены и производительности.
<b>Тонкопленочные модули</b>	Изготавливаются путем нанесения тонких слоев полупроводниковых материалов на подложку. Включают аморфный кремний, кадмий-теллуриды (CdTe), медь-индий-галлий-диселенид (CIGS).	Широко используются в BIPV-системах благодаря своей гибкости и возможности интеграции в различные поверхности. Менее эффективны (КПД около 10-13%), но хорошо подходят для фасадов и крыш сложной формы.
<b>Органические фотоэлектрические модули (OPV)</b>	Созданы на основе органических полимеров. Легки, гибки и могут быть прозрачными, что делает их идеальными для использования в окнах и других прозрачных конструкциях.	Применяются преимущественно в BIPV-проектах, где важен дизайн и возможность интеграции в сложные архитектурные элементы. Эффективность пока относительно низкая (до 12%).
<b>Перовскитные фотоэлектрические модули</b>	Новые разработки, основанные на перовскитных материалах. Обещают высокий КПД (более 25%) и низкую себестоимость производства.	Пока находятся на стадии исследований и разработок, но имеют большой потенциал для использования в будущих BIPV-системах.

Монокристаллические и поликристаллические панели остаются популярными для большинства проектов, тогда как тонкие пленки и новые технологии открывают перспективы для более сложных и инновационных решений.

Монтаж солнечных панелей на фасаде зданий имеет свои особенности, которые следует учитывать для обеспечения надежности, безопасности и максимальной эффективности системы. При этом необходимо обратить внимание на следующие моменты. Если здание имеет историческую ценность или является памятником архитектуры, любое вмешательство должно быть тщательно продумано. Установка солнечных панелей должна соответствовать стилю эпохи и не портить оригинальный облик здания. В некоторых случаях может потребоваться согласование с органами охраны культурного наследия.

## Заключение

Таким образом, интеграция фотоэлектрических панелей в здания с сохранением архитектурного наследия, представляет собой перспективный путь к созданию энергоэффективных и экологически устойчивых сооружений. Благодаря развитию технологий и повышению доступности солнечных модулей, этот подход становится все более популярным среди архитекторов и застройщиков. При этом важно подчеркнуть значимость бережного отношения к историческим объектам и внедрения технологически обоснованных нововведений, гармонично соединяющих традиционность и современные решения.

Исследование в этом направлении следует продолжать потому, что оно позволяет объединить цели сохранения культурных артефактов с внедрением экологически чистых энергетических решений в строительной сфере, приближаясь к глобальной задаче декарбонизации экономики.

## Список литературы

1. Якушев, А. М. Интеграция фотоэлектрической станции в архитектуру зданий / А. М. Якушев, С. С. Шипилов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2025. – Т. 13, № 1. – С. 69-73.

2. Aelenei, L., Gonçalves, H., Lopes, R.A., Rodrigues, E., Almeida, M.G., Barbosa, R.S. (2016). Review on the main building-integrated renewable energy sources and technologies effectiveness in European warm climates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, pp. 1250-1259.

3. Advanced solar power, <http://www.advsolarpower.com/case/case-info/7/327> (Дата обращения 27.04.2025 г.)

4. C. Vassiliades, R. Agathokleous, G. Barone, C. Forzano, G.F. Giuzio, A. Palombo, A. Buonomano, S. Kalogirou (2022) Building integration of active solar energy systems: A review of geometrical and architectural characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 164, 112482.

## References

1. Yakushev, A. M. Integration of photovoltaic power plant into building architecture / A. M. Yakushev, S. S. Shipilov // Energy and resource saving in heat and power engineering and the social sphere: Proceedings of the International scientific and technical conference of students, graduate students, scientists. - 2025. - Vol. 13, No. 1. - P. 69-73.

2. Aelenei, L., Gonçalves, H., Lopes, R. A., Rodrigues, E., Almeida, M. G., Barbosa, R. S. (2016). Review on the main building-integrated renewable energy sources and technologies effectiveness in European warm climates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, pp. 1250-1259.

3. Advanced solar power, <http://www.advsolarpower.com/case/case-info/7/327> (Accessed 04/27/2025)

4. C. Vassiliades, R. Agathokleous, G. Barone, C. Forzano, G.F. Giuzio, A. Palombo, A. Buonomano, S. Kalogirou (2022) Building integration of active solar energy systems: A review of geometrical and architectural characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 164, 112482.

## Сведения об авторах

**Чжу Синьюй** - магистрант, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, [chzhu.s@yandex.com](mailto:chzhu.s@yandex.com).

**Биань Ивэнь** - магистрант, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, [bianyiwen1001@gmail.com](mailto:bianyiwen1001@gmail.com).

**Лю Чан** - магистрант, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, [fluent926@yandex.ru](mailto:fluent926@yandex.ru).

