

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 9 № 4

**Севастополь
2023**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь:
ФГАОУ ВО СевГУ, 2023. – Т. 9. - № 4. – 92 с.: ил.**

В научный журнал «Энергетические установки и технологии», включены статьи, посвященные актуальным вопросам современной энергетики. Журнал состоит из разделов: тепловые и ядерные энергетические установки, электротехнические комплексы и системы, экологическая безопасность, химические технологии атомных станций, информационные технологии в энергетике, моделирование физических процессов, физика в ядерной энергетике, автоматизация процессов контроля и управления, судовые энергетические установки, холодильные установки, гидравлические энергоустановки, компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Предназначен для научных работников, инженеров и специалистов, работающих на предприятиях и в организациях энергетики, аспирантов и студентов технических вузов. Журнал выходит 4 раза в год.

Редакционная коллегия:

Якимович Б.А. (главный редактор), д.т.н., профессор;
Губарев Ф.А. (заместитель главного редактора), д.т.н., профессор;
Черкашина Н.И. (ответственный секретарь), к.т.н., доцент;
Нестерова Е.А. (технический редактор);
Абу Исса Никола Наджиб, профессор Дамасского университета;
Божек Павол, к. т. н., профессор, почетный доктор; (Doctor Honoris Causa);
Ли Линь, к. т. н., доцент, *Червинский В. Л.*, к. т. н., доцент;
Губарев Ф. А., д. т. н., доцент; *Завьялов В. М.*, д. т. н., доцент;
Губин В.Е., к. т. н., доцент; *Пак А. Я.*, д.т.н., заведующий лабораторией ЛПМЭО ИШЭ;
Комшин А. С., д. т. н., доцент; *Мостовицков А. В.*, д. т. н., доцент;
Семыкина И. Ю., д. т. н., доцент; *Яковичин Л. А.*, доктор, доцент фармацевтическая химия; *Завьялов В. М.*, д. т. н., доцент; *Вологдин С. В.*, д.т.н., доцент;
Омельчук Ю. А., к. х. н., доцент; *Браславский Ю. В.*, к.т.н., доцент;
Матузаев К. Б., к. т. н, доцент; *Высоцкий В. Е.*, д. т. н, профессор;
Магдыч Е.А., к.т.н., доцент; *Кучерик Г.В.*, к. х. н, доцент; *Скидан А.А.*, к.т.н., доцент;
Козырь Д. А., к.т.н., доцент; *Ожиганова М. И.*, к. т. н, доцент.

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Рекомендован к печати Ученым советом ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	5
<i>Афанасьев В.А., Кувишинов В.В., Нашев Р.А., Косий А.Г.</i> Использование комбинированной выработки ветровых и солнечных станций для электроснабжения потребителей Крымского региона и города Севастополя	5
<i>Березняк В.А., Власов Н.А., Фролова А.Н., Косий А.Г., Артеменко И.Д.</i> Проведение экспериментальных исследований измерения энергетического потенциала солнечной станции	12
<i>Власов Н.А., Ивантеев И.С., Фролова А.Н., Меджитов М.Р., Нашев Р.А.</i> Методика расчета эффективности работы гелиоприемных устройств	18
<i>Нашев Р.А., Фролова А.Н., Жильцов А.С., Касницкий А.Д., Владимиров А.С.</i> Геотермальная энергетика для теплоснабжения потребителей Крыма	24
<i>Скрипник Е.М., Кувишинов В.В., Борисов Б.Е., Меджитов М.Р.</i> Использование генерирующих установок на основе солнечных электростанций для обеспечения потребителей Крыма	31
<i>Сперанский М.Ю., Лавренчук А.А., Губская А.В., Кабанцова И.С., Петрушин А.А.</i> Синтез и исследование высшего бориды вольфрама на основе борофена с применением электродугового атмосферного реактора	36
<i>Цветков А.С., Кувишинов В.В., Владимиров А.С., Артеменко И.Д., Касницкий А.Д.</i> Автономные ветроэлектрические установки для электроснабжения индивидуальных потребителей в Крымском регионе	42
Информационные технологии в энергетике	47
<i>Довгаленко В.В.</i> Определение расстояния между двумя щелями интерференционным методом	47
<i>Исаев А.В., Мозолевская Т.В., Андреев А.В.</i> Выявление различных повреждений поверхностей с использованием робототехники	51
<i>Контылева Е.А.</i> Классификация огибающей доплеровского сигнала для возможной идентификации объекта	57
<i>Н.К. Корнеева</i> Изменение методического подхода к изучению одного из разделов теоретической механики для студентов направления подготовки 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг»	61
Химические технологии	64
<i>Калтаев А.Ж., Губин В.Е., Ларионов К.Б., Губин А.В.</i> Исследование процессов зажигания и горения водоугольной суспензий с использованием пирогазетической жидкости	64
<i>Муреева К.В.</i> Установка «Плутон»	71
<i>Пичугова Л.Н.</i> Защита от коррозии на АЭС	74
<i>Слюсарский К.В., Асильбеков А.К.</i> Влияние способа смешения пиролизного масла и угля на закономерности формирования газофазных продуктов сгорания	84
Для авторов	91

CONTENTS

Alternative and renewable energy sources	5
<i>Afanasyev V.A., Kuvshinov V.V., Nashev R.A., Kosiy A.G.</i> The use of combined generation of wind and solar power plants for power supply to consumers of the Crimean region and the city of Sevastopol	5
<i>Bereznyak V.A., Vlasov N.A., Frolova A.N., Kosiy A.G., Artemenko I.D.</i> Conducting experimental studies of measurement of the energy potential of a solar station	12
<i>Vlasov N.A., Ivanteev I.S., Frolova A.N., Medzhitov M.R., Nashev R.A.</i> Method for calculating the operation efficiency of solar reception Devices	18
<i>Nashev R.A., Frolova A.N., Zhiltsov A.S., Kasnitsky A.D., Vladimirov A.S.</i> Geothermal energy for heat supply to Crimean consumers	24
<i>Skripnick E.M., Kuvshinov V.V., Borisov B.E., Medjitov M.R.</i> The use of generating plants based on solar power plants to provide consumers of Crimea	31
<i>Speranskiy M.Yu., Lavrenchuk A.A., Gubskaya A.V., Kabantsova I.S., Petrushin A.A.</i> Synthesis and research of higher boron-based tungsten boride using an electric arc atmospheric reactor	36
<i>Tsvetkov A.S., Kuvshinov V.V., Vladimirov A.S., Artemenko I.D., Kasnitsky A.D.</i> Autonomous wind electric installations for power supply of individual consumers in the Crimea region	42
Information technologies in the energy sector	47
<i>Dovgalenko V.V.</i> Determination of the distance between two slits by the interference method	47
<i>Isaev A.V., Mozolevskay T.V., Andreev A.V.</i> Identification of various surface damages using robotics	51
<i>Kontyleva E.A.</i> Classification of the Doppler signal envelope for possible object identification	57
<i>Korneeva N.K.</i> Changing the methodological approach to the study of one of the sections of theoretical mechanics for students of the field of study 05.14.02 "Nuclear power plants: design, operation and engineering"	61
Chemical technologies	64
<i>Kaltaev A.Zh., Gubin V.E., Larionov K.B., Gubin A.V.</i> Investigation of ignition and combustion processes of water-coal slurry using pyrogenetic liquid	64
<i>Mureeva K.V.</i> "Pluton" technology	71
<i>Pichugova L.N.</i> Corrosion protection at nuclear power plants	74
<i>Slyusarskiy K.V., Asilbekov A.K.</i> Effect of mixing method of pyrolysis oil and coal on features of gas-phase combustion products formation	84
For cars	91

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620:92

Использование комбинированной выработки ветровых и солнечных станций для электроснабжения потребителей Крымского региона и города Севастополя

В.А Афанасьев, В.В. Кувшинов, Р.А. Нашев, А.Г. Косий

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, ramos.matveev@bk.ru

Статья поступила 29.11.2023 г.; после доработки 01.12.2023 г.

Аннотация

В работе был рассмотрен вариант снабжения потребителей электроэнергией с использованием установок на основе возобновляемых видов энергии, при расположении их в Крыму. Солнечные и ветровые энергетические технологии, экологически чистые и доступные, вполне могут заменить или дополнить традиционные способы получения энергии. Это реализуется посредством комбинированных (гибридных) энергосистем, объединяющих технологии использования возобновляемых и невозобновляемых источников энергии и предназначенных для использования преимущественно для энергоснабжения автономных потребителей.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, фотоэлектрическая панель, солнечная электростанция, энергосистема Крыма, автономный потребитель.

The use of combined generation of wind and solar power plants for power supply to consumers of the Crimean region and the city of Sevastopol

V.A. Afanasyev, V.V. Kuvshinov, R.A. Nashev, A.G. Kosiya

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ramos.matveev@bk.ru

Received 29.11.2023 y.; received in final form 01.12.2023 y.

Annotation

The paper considered the option of supplying consumers with electricity using installations based on renewable energy, when they are located in the Crimea. Solar and wind energy technologies, environmentally friendly and affordable, may well replace or complement traditional methods of energy production. This is implemented through combined (hybrid) power systems that combine technologies for the use of renewable and non-renewable energy sources and are intended to be used primarily for energy supply to autonomous consumers.

Keywords: renewable energy, photovoltaic panel, solar power plant, Crimean energy system, autonomous consumer.

Введение

На сегодняшний день возобновляемая энергетика весьма разнообразна и охватывает технологии, основанные на совершенно разных физи-

ческих процессах при использовании солнечного света, приливов и отливов, ветра, геотермальной теплоты, водных потоков, а также энергии волн. На данный момент доля возобновляе-

мой энергетики, в частности солнечной и ветровой энергетики в мировом энергетическом балансе стабильно растет и составляет 10.7%. В большинстве районов приход солнечной радиации и наличие ветра находятся в противофазе (т.е. когда светит яркое солнце, обычно нет ветра, а если дует сильный ветер, то солнца нет). Поэтому для обеспечения бесперебойного электроснабжения автономного объекта, уменьшения необходимой мощности ветротурбины и солнечной батареи и емкости аккумуляторной батареи, улучшения режимов работы станции во многих случаях целесообразно использование гибридной ветро-солнечной электростанции.

Целью данной работы является анализ перспективных решений по созданию эффективных энергоустановок, работающих только на возобновляемых источниках энергии, используя при этом энергию ветра и солнца. В частности, ставится задача разработки гибридной электростанции на основе ветро-солнечных преобразователей.

Постановка задачи

Автономные ветро-солнечные электрические системы могут быть различной мощности. Для питания маломощной нагрузки — например, 2-3 люминесцентных или светодиодных светильника, телевизор, радио и другую маломощную нагрузку постоянного тока, небольшой холодильник — система строится на базе маломощных ветроэлектрических установок мощностью 200-100Вт. Такие системы рекомендуются при среднегодовых скоростях ветра от 3-3.5 м/с. Вы при этом не получите максимум энергии от вашей ветроустановки, однако и цена ветряка позволяет получать электроэнергию за вполне приемлемые деньги. Более мощные системы на базе ВЭУ мощностью до 5 кВт могут питать отдельно стоящие коттеджи и малые производственные объекты. Стоимость такой ветроэлектрической системы высока, ее применение рекомендуется при среднегодовых скоростях ветра более 4 м/с. В противном случае срок окупаемости может растянуться на долгие годы. Применять ветроустановки мощностью более 5 кВт нужно с большой осторожностью и тщательно выбирать место их установки. Среднегодовая скорость ветра в таких местах должна быть не

менее 4 м/с, иначе вы получите от вашей ВЭУ только малую часть от паспортной выработки электроэнергии. Практически любая система электроснабжения с ветроэлектрической установкой может быть дополнена бензо или дизельным генератором для питания нагрузки переменного тока (освещение, телевизор, аудиосистема, холодильник, стиральная машина и т.д.) в качестве дополнительного источника электроэнергии на период безветрия или пиковой нагрузки, а также солнечными батареями. Особенно ощущаются преимущества гибридных станций при круглогодичном использовании. При этом в зимнее время основная выработка электроэнергии приходится на ветроэлектрическую установку, а летом — на солнечные фотоэлектрические модули.

Результаты исследования

Рассмотренные в работе конструкции гибридных систем можно выполнить с помощью ветроустановки мощностью от 200 до 5000 Вт и мощностью солнечных батарей от 100 до 3000 Вт. Все эти ветро-солнечные станции будут построены на базе маломощных ветроэлектрических станций. Напряжение на стороне постоянного тока — может быть 12, 24 и 48 В для ветроустановок мощностью от 200 до 5000 Вт или 120 В и выше — для ветроустановок большей мощности. Возможно подключение солнечных батарей практически любой мощностью через дополнительный контроллер заряда. В общем случае гибридная ветросолнечная электростанция будет состоять из следующих компонентов:

1. Ветроэлектрической установки, включающей ветротурбину, мачту, блок контроля и управления зарядом аккумуляторной батареи, балластную нагрузку
2. фотоэлектрических солнечных модулей
3. контроллера заряда для солнечных батарей (может быть встроен в гибридных контроллер для ветрогенератора)
4. Инвертора необходимой мощности
5. Аккумуляторных батарей, хорошо переносящих режимы глубокого циклирования — карбоновых свинцово-кислотных, гелевых, а еще лучше — литий-железо-фосфатных.
6. соединительных кабелей, другого электро-монтажного оборудования.

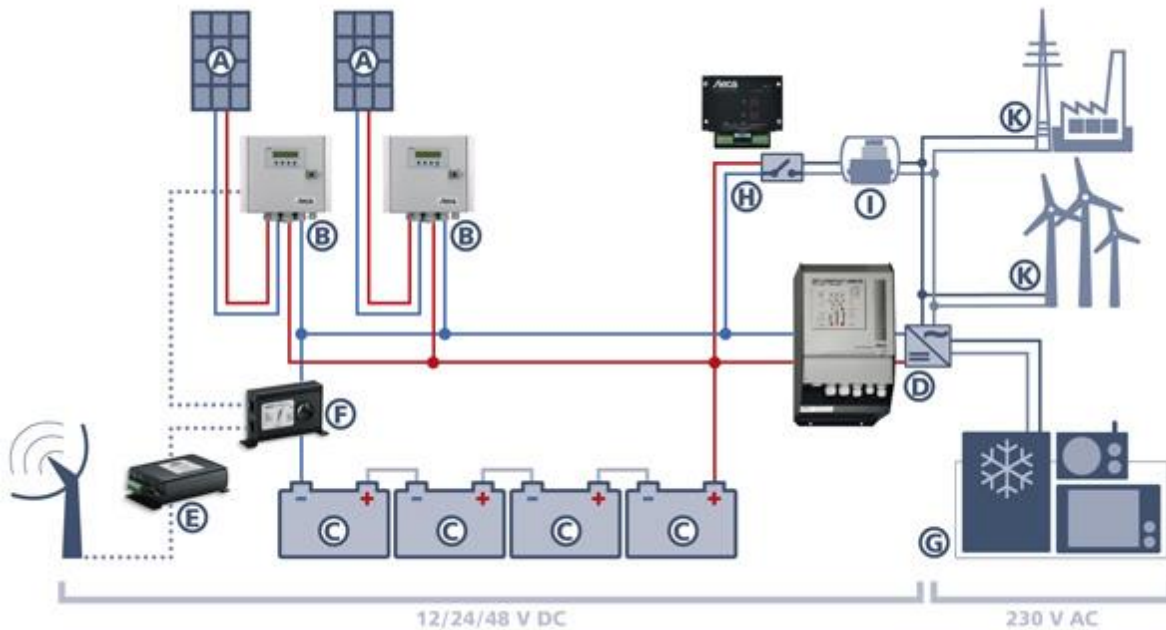


Рис. 1 Система электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и аккумуляторами, соединенной с сетью

В ветро-солнечных гибридных энергоустановках рекомендуется применять свинцово-кислотные аккумуляторы глубокого разряда OpzV или карбоновые. Также, возможно применение тяговых аккумуляторов с жидким электролитом. Лучше всего применять литиевые аккумуляторы, которые имеют ряд преимуществ перед свинцово-кислотными (не боятся нахождения в разряженном состоянии, быстро заряжаются, имеют больше циклов заряда-разряда и т.п.). Не рекомендуется применять обычные аккумуляторы (как герметизированные, так и с жидким электролитом), и особенно стартерные автомобильные, так как они не рассчитаны для циклических режимов заряда-разряда. Не рекомендуется использовать щелочные аккумуляторы, потому что они не могут заряжаться малыми токами, и в большинстве случаев их режимы заряда не предусмотрены в широко распространенных ББП и зарядных устройствах.

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения желательно также ввести в систему небольшой бензоэлектрический агрегат на случай отсутствия ветра и яркого солнца в течение продолжительного периода времени. В этом случае инвертор должен быть заменен на ББП с функцией зарядки аккумуляторов, или, если нужны большие токи зарядки, использовать отдельное зарядное устройство для аккумуляторов. Также необходимо установка мачты достаточной высоты — нижний край лопасти должен быть минимум на 10 метров выше любого препятствия в радиусе 500 м от ветротурбины. В

противном случае выработка энергии ветротурбиной очень сильно снижается, и мы не получим ожидаемого эффекта от применения ветроэлектрической станции. Низкая мачта — основная причина меньшей, чем расчетная, производительности ветроустановок.

На ветроэлектрических станциях Крыма расположены сотни ветроэлектрических турбин (ВЭУ) различной мощности (рис. 2). При этом среднегодовой коэффициент их использования составляет около 0,3-0,4. ВЭС генерируют электроэнергию в основном в зимние или осенне-весенние месяцы, обычно летом их эффективность мала [1-4].

Одним из перспективнейших направлений использования солнечной энергетики является применения фотоэлектрических систем (ФЭС) — систем прямого преобразования световой энергии солнечного излучения в электричество. Преимущества ФЭС прямого преобразования состоят в том, что они не имеют движущихся механических частей, не нуждаются в воде или другом теплоносителе. В зависимости от конструктивного исполнения практически не нуждаются в обслуживании.

В настоящее время в результате использования новых полупроводниковых материалов, повышения их коэффициента полезного действия, удешевления стоимости и качественного улучшения характеристик стало возможным более широкое применение фотоэлектрических преобразователей и реализованных на их основе солнечных батарей.



Рис. 2. Ветроэлектрические станции (ВЭС) Крыма

В настоящее время на территории крымского региона находится несколько солнечных электростанций (СЭС) номинальной мощностью

более 300 МВт (рис. 3). Т. к. солнечная инсоляция максимальна в летние и некоторые весенне-осенние месяцы (с мая по октябрь), то зимняя выработка СЭС мала [5-6,8].



Рис. 3 Солнечные электростанции (СЭС) Крыма

Для обеспечения индивидуального потребителя в Крыму и г. Севастополе предлагается использование маломощных солнечных фотоэлектрических станций с системами накопления энергии (рис. 4).

Такие установки способны обеспечить частное домовладение необходимой электрической энергией в периоды нехватки или отключения мощности централизованной электрической сети. При этом аккумуляторные батареи (АКБ) способны заряжаться и от общей сети в периоды малой солнечной инсоляции.

Как видно из приведенных выше данных

ветровая или солнечная электрогенерирующая система в отдельности неспособна в течение года полностью обеспечить потребителя. При этом вся мощностная нагрузка в некоторые периоды года ляжет на центральную электросистему.

Однако если устанавливать комбинированные ветро-солнечные электрические станции с возможностью генерировать электроэнергию для автономного потребителя или в общую сеть, то график мощности (как показали проведенные исследования) в разные месяцы года значительно «сглаживается».



Рис. 4 Маломощные солнечные установки для автоматического потребителя в Крымском регионе (справа 5,4 кВт, слева 500 Вт с аккумуляторной системой и инвертором)

На рис. 5 приведен график выработки электрической энергии некоторыми станциями Крыма в различные месяцы года (с января по де-

кабрь), где верхний график показывает суммарную выработку ветровыми и солнечными станциями.

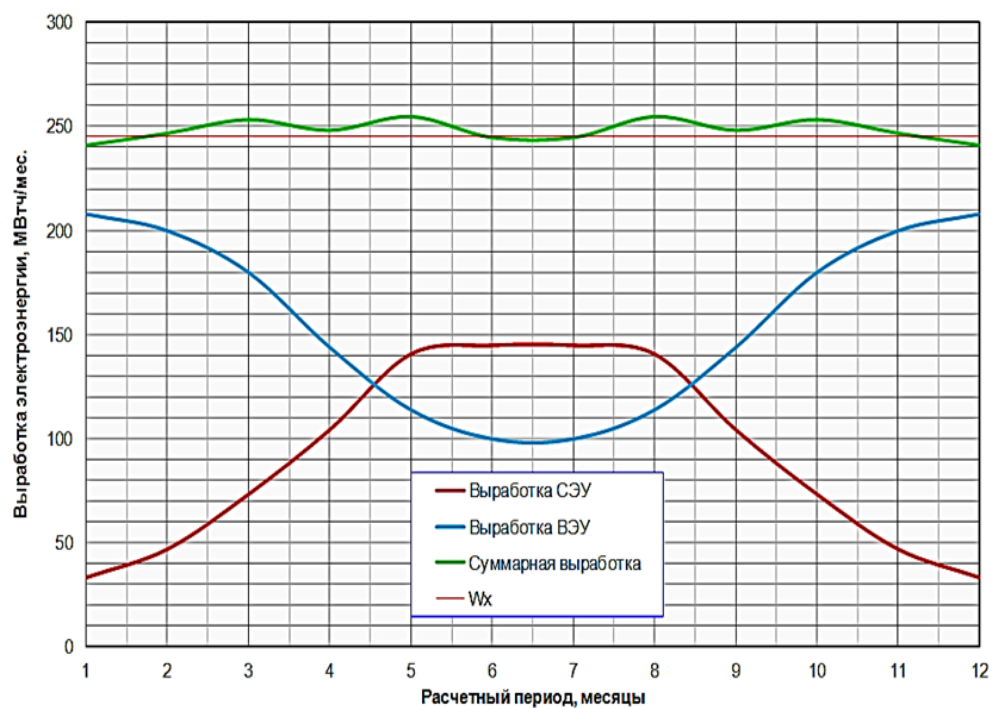


Рис. 5 График комбинированной выработки ветровых и солнечных станций для электроснабжения потребителей Крыма

Исходя из данных графика видно, что в зимние месяцы выработка ВЭС выше (данные 1-го (январь и 12-го (декабрь) месяца), а летом наоборот выше выработка СЭС. И только в середине апреля и августа графики выработки пересекаются. С учетом использования для автономных потребителей систем накопления энергии каче-

ство электрообеспечения индивидуальных жилых домов будет ещё значительно выше. Поэтому приложенные комбинированные станции могут значительно увеличить эффективность использования генерируемой энергии и улучшить электроснабжение отдельных регионов республики Крым и города Севастополь [7,9-10].

Выводы

Предложенные комбинированные электрогенерирующие установки использовать выгоднее чем отдельные солнечные и ветровые станции, так как будет обеспечиваться эффективное электроснабжение автономного объекта или генерация электроэнергии в общую сеть. При этом возможно при сохранении необходимой мощности ветротурбины и солнечных панелей уменьшение ёмкости аккумуляторных батарей, а также улучшение режимов работы станции.

Комбинированная выработка ветровых и солнечных станций значительно повышает эффективность и сглаживает нагрузки на энергосистему. Проведенные исследования показали, что при введении в эксплуатацию предложенных ветро-солнечных электростанций уменьшается негативное влияние работы ВИЭ на энергосистему. Расположение на одной площадке ВЭС и СЭС позволяет стабилизировать выработку электрической энергии и равномерно отдавать мощность в энергосистему. Данное решение позволит сократить потери энергии в связи с неравномерной генерацией СЭС и ВЭС по месяцам

Установка ВЭУ и солнечных панелей позволяет не только экономить традиционные энергоресурсы, но и способствует значительному уменьшению вредных выбросов в атмосферу и улучшает экологическую составляющую прибрежных зон Крымского полуострова

Список литературы

1. Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Грибков С.В. Ветроэнергетика: Справочнометодическое издание / Под общей редакцией П.П. Безруких. — М.: «ИнтехэнергоИздат», «Теплоэнергетик», 2014. — 304 с.
2. Безруких П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). М.: –ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010, 320 с.
3. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
4. Ясон Р.А. Ветроустановки: Учеб. пособие по курсам «Ветроэнергетика», «Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников энергии», «Введение в специальность» / Под ред. М.И. Осштова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - 36 с: ил.
5. Кувшинов В.В., Морозова Н.В. Энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии: Учебное пособие / В.В. Кувшинов, Н.В. Морозова, И.Ю. Софийский. – М.: Издательство «Спутник +», 2018. – С.4-70.

6. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2022 году.// Системный оператор единой энергетической системы.
7. Технологии повышения эффективности работы комбинированных электростанций на основе возобновляемых видов энергии / Кувшинов В.В., Власов Н.А., Коломийченко В.П., Ивантеев И.С., Меджитов М.Р. // В сборнике: Перспективные технологии и материалы. Материалы Международной научно-практической конференции. Севастополь, 2022. С. 370-374.
8. Возможности повышения эффективности электрогенерации фотоэлектрических модулей / Кувшинов В.В., Гусева Е.В., Березняк В.А., Тиман Д.И., Ивантеев И.С. // Естественные и технические науки. 2022. № 5 (168). С. 266-268
9. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года.
10. В.Г. Королев. Современные особенности и состояние электроэнергетической отрасли РФ — «Инновации и Инвестиции» №10, 2020 — С215-219.

References

1. Bezrukikh P.P., Bezrukikh P.P. (ml.), Gribkov S.V. Wind energy: Referencemethodical edition / Under the general editorship of P.P. Bezrukikh. — M.: "IntehenergoIzdat", "Teploenergetik", 2014. — 304 p
1. 2. Bezrukikh P.P. Wind Power. (Reference and methodological manual). M.: –
2. ID "ENERGY", 2010, 320 p.
3. Kharitonov V.P. Autonomous wind power plants. – M.: GNU RESH, 2006. – 280 p.
4. Yayason R.A. Wind turbines: Textbook on the courses "Wind energy",
5. "Energy of non-traditional and renewable energy sources", "Introduction to the specialty" / Edited by M.I. Osshtov. - M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2007. - 36 p.: ill.
6. Kuvshinov V.V., Morozova N.V. Power plants based on renewable energy sources: Textbook / V.V. Kuvshinov, N.V. Morozova, I.Yu. Sofiyskiy. – M.; Publishing House "Sputnik +", 2018. – pp.4-70.
7. Report on the functioning of the UES of Russia in 2022.// System operator of the unified energy system.
8. Technologies for improving the efficiency of combined power plants based on renewable energy / Kuvshinov V.V., Vlasov N.A., Kolomiichenko V.P., Ivanteev I.S., Medzhitov M.R. // In the collection: Promising technologies and materials. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Sevastopol, 2022. pp. 370-374.
9. Possibilities of increasing the efficiency of photovoltaic modules' power generation / Kuvshinov V.V., Guseva E.V., Bereznyak V.A., Timan D.I., Ivanteev I.S. // Natural and technical Sciences. 2022. No. 5 (168). pp. 266-268 Russia's energy strategy for

the period up to 2035.

10. V.G. Korolev. Modern features and state of the electric power industry of the Russian Federation — "Innovations and Investments" No. 10, 2020 — C215-219.

УДК 620.92

Проведение экспериментальных исследований измерения энергетического потенциала солнечной станции

В.А. Березняк¹, Н.А. Власов, А.Н. Фролова, А.Г. Косий., И.Д. Артеменко²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, ¹gern96-10@mail.ru

Статья поступила 29.11.2023 г.; после доработки 30.11.2023 г.

Аннотация

Для расчетов характеристик солнечной электростанции была использована методика определения температурного, ветровой и солнечного потенциала (инсоляции) непосредственно в натурных условиях. Представленные параметры могут постоянно изменяться из-за атмосферных факторов. Определение энергетических характеристик солнечных станций имеет важную особенность, которая зависит от множества факторов, одним из которых является атмосферная зависимость и другие климатические факторы, влияющие на работу приёмных поверхностей фотопреобразователей.

Ключевые слова: фотоэлектрические системы, коэффициент преобразования, солнечные панели, фотоэлектрические преобразователи, люксметр.

Conducting experimental studies of measurement of the energy potential of a solar station

V.A. Bereznyak¹, N.A. Vlasov, A.N. Frolova, A.G. Kosiya, I. D. ArtemenkoSevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ¹gern96-10@mail.ru

Received 29.11.2023 y.; received in final form 30.11.2023 y

Abstract

To calculate the characteristics of a solar power plant, a technique was used to determine the temperature, wind and solar potential (insolation) directly under natural conditions. The presented parameters may constantly change due to atmospheric factors. Determining the energy characteristics of solar stations has an important feature, which depends on many factors, one of which is atmospheric dependence and other climatic factors affecting the operation of the receiving surfaces of photoconverters.

Key words: photovoltaic systems, conversion factor, solar panels, photovoltaic converters, luxmeter.

Введение

Ресурсы ископаемых видов топлива расходуются высокими темпами. Уже в этом столетии их дефицит может существенно сказаться на жизни людей, в связи с чем в качестве альтернативы особое внимание уже сейчас уделяется возобновляемым источникам энергии (ВИЭ). Основными преимуществами возобновляемых источников являются неисчерпаемость и экологи-

ческая чистота эксплуатации большинства установок на их основе. Именно эти свойства определяют перспективность данного направления. В ФЭМ для выработки электроэнергии используется только часть приходящей солнечной радиации (КПД широко распространённых ФЭМ из кристаллических кремниевых СЭ оценивается в 14-19%), остальная – рассеивается в виде теплоты в окружающее пространство. Эффективная работа фотоэлектрических преобразователей

(ФЭП) в процессе эксплуатации – одна из актуальнейших задач. Во время работы ФЭП под воздействием СИ их температура достигает высоких значений, из-за чего существенно снижается эффективность выработки электрической энергии. В связи с огромным потенциалом, которым обладает солнечная энергия, учитывая оптимистичные прогнозы развития и наблюдаемые темпы снижения стоимости ФЭП, важно сегодня развивать исследования в области солнечной энергетики, чтобы в будущем не возникало зависимости от импортных установок [1-5]. В задачи данной работы входило измерение поверхностной температуры в разных точках фотоэлектрических панелей, батарей и станции в целом по заранее составленной схеме измерений, измерить температуру воздуха в сечении между рядами батарей и скорость ветра в этих же точках станции, для выявления воздействия воздушного потока на температурное состояние фотоэлектрических панелей и на их КПД, а также электрическую мощность. Объектом исследования при написании работы послужила солнечная электростанция расположенная в Севастополе на улице Богданова. Целью работы являлось исследование температурного состояния солнечной электростанции и использование данных для проектирования строительства солнечных станций на территории Южных регионов России.

Постановка задачи

В задачи данной работы входило измерение поверхностной температуры в разных точках фотоэлектрических панелей, батарей и станции в целом по заранее составленной схеме измерений, измерить температуру воздуха в сечении между рядами батарей и скорость ветра в этих же точках станции, для выявления воздействия воздушного потока на температурное состояние фотоэлектрических панелей и на их КПД, а также электрическую мощность. В общем случае СЭС состоит из большого числа отдельных модулей (фотоэлектрических панелей) различной мощности и выходных параметров (рис. 1). Данные СЭС широко применяются для энергообеспечения как малых, так и крупных объектов (частные коттеджи, пансионаты, санатории, промышленные здания и т. д.). Устанавливаться фотоэлектрические панели могут практически везде, начиная от кровли и фасада здания и заканчивая специально выделенными территориями. Установленные мощности тоже колеблются в широком диапазоне, начиная от снабжения отдельных

насосов, заканчивая электроснабжением городов.



Рис. 1. Солнечная фотоэлектрическая станция

Сетевые on-grid солнечные фотоэлектрические станции (СЭС, ФЭС, PV farms, PV power plants или просто PV plants) — один из видов электростанций, генерирующий электричество путем преобразования солнечного излучения в электрическую энергию с последующей ее передачей в централизованную сеть. Сетевые (on-grid) фотоэлектрические системы как объекты солнечной энергетики могут работать по «зеленому» тарифу (англ. Feed-in tariff — FIT), продавая электроэнергию во внешнюю сеть, так и использоваться для производства электроэнергии с целью собственного потребления.

В состав сетевой фотоэлектрической системы входят следующие элементы (рис. 2):

- Солнечные батареи, вырабатывающие постоянный ток под действием попадающего на их поверхность солнечного излучения;
- Сетевые инверторы, преобразующие постоянный ток (DC), генерируемый солнечными панелями, в переменный ток (AC);
- Система мониторинга ФЭС, позволяющая отслеживать параметры работы солнечной электростанции;
- Счетчики, предназначенные для мониторинга производительности системы и продажи электроэнергии по "зеленому" тарифу;
- Поддерживающие металлоконструкции для размещения солнечных батарей на поверхности земли, крыше здания и т.п. или подвижные поворотные солнечные трекеры;
- Централизованная сеть - линия электропередач (ЛЭП), к которой подсоединена электростанция;
- Собственные потребители электроэнергии (промышленные или бытовые электроприборы).

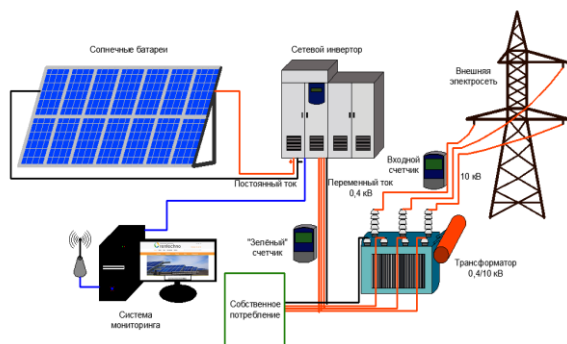


Рис. 2. Структурная схема типовой сетевой солнечной электростанции

Способы преобразования солнечной радиации различны и зависят от структуры и конструкции электростанции. Наиболее широко используется фотоэлектрический эффект и базирование на кремниевых фотоэлектрических модулях наземного применения. В настоящее время данная технология является доминирующей и по прогнозам экспертов останется основной на протяжении следующих 15-20 лет. Конструкция фотоэлектрических панелей обеспечивает высокую надежность и защищенность солнечных электростанций в целом. Обычно срок эксплуатации такой электростанции составляет не менее 25...30 лет. При этом снижение мощности, вызванное естественным старением электронных компонентов фотоэлектрической батареи, не превышает 20% после 25 лет эксплуатации ФЭС.

Результаты исследования

Объект расположен в г. Севастополь на улице Богданова, 74а. Станция на фотоэлектрических элементах имеет номинальную мощность 2,35 МВт, расположена на земельном участке площадью 5,3 гектар с наибольшей шириной 275 м и наибольшей длиной 205 м. Проектная мощность 3,026 МВт не достигнута из-за того, что часть станции недостроенная (рис. 3).

Так как один солнечный элемент не производит достаточного количества электроэнергии, солнечные элементы собираются в солнечных панелях (также называемые фотоэлектрические или солнечные модули) для того, чтобы производить больше электричества.

Солнечные панели производятся из псевдоквадратных монокремниевых или квадратных поликремниевых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), покрытых антиотражающим покрытием. Это кремниевые фотоэлектрические модули мощностью 240-260 W (пиковый ватт,

т.е. мощностью максимум в 240-260 Вт при ярком Солнце). Такой солнечный модуль имеет размер до 1,66 м².



Рис. 3. Фотография станции «ООО Энерджи Севастополь»

Солнечные панели соединены между собой в солнечные батареи для того, чтобы получить большую мощность (например, 18 модулей по 260 W, соединенных вместе, эквивалентны модулю мощностью 4680 W). Всего станция имеет 15 рядов. Каждый ряд представляет собой определенное количество батарей, расположенных на одной линии, параллельной большей стороне каждой панели (рис. 4). Батареи состоят из модулей, установленных в одной плоскости, причем более короткая грань корпуса модулей располагается горизонтально как показано на фотографии. В ширину расположено 6 панелей (5,98 метра), в высоту – 3 панели (5 метров). Всего 18 панелей в одной батарее (5,98м x 5м). Эта конструкция смонтирована на оцинкованных стальных опорах. Лицевая (освещаемая солнцем) сторона батареи наклонена к горизонту под углом 27°.



Рис. 4. Ряды станции (фотография со спутника)

Электрически, батареи соединяются между собой вместе и подключаются через клеммные коробки к щитам. Каждому щиту соответствует инвертор (рис. 5), имеющий номинальную мощность 100 кВт. На станции находятся 25 инверторов.



Рис. 5. Фотография инвертора.

Исследование работы солнечной станции

Известно, что КПД полупроводниковых кремниевых элементов падает с увеличением их температуры [1-5]. Зависимости изменения КПД фотоэлемента от температуры носят линейный характер:

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 - \kappa(T - T_0)), \quad (1)$$

где T – температура солнечного элемента; κ – температурный градиент, зависящий от типа и конструкции фотопреобразователя (0,3-0,5 %/°C); η_0 – КПД ФЭП при стандартных условиях (освещенность 1000 Вт/м², $T_0 = 25$ °C). Следовательно, зная температурный показатель СЭС можно с большой вероятностью прогнозировать изменение её выработки [16,20]. Причем при повышении температуры рабочей поверхности модулей выше 25 °C КПД фотоэлементов будет падать, а выше расти. Следовательно, при низких температурах выработка будет расти, а при высоких падать [10]. В задачи данной работы входит измерение поверхностной температуры в разных точках фотоэлектрических панелей [8-9], батарей и станции в целом по заранее составленной схеме измерений, измерить температуру воздуха в сечении между рядами батарей и скорость ветра в этих же точках станции, для выявления воздействия воздушного потока на температурное состояние фотоэлектрических панелей и на их КПД, а также электрическую мощность. Для проведения исследований используются 4 прибора: лазерный пирометр RGK PL-8 для измере-

ния температуры поверхности модулей, люксметр Ю116 для измерения освещенности на поверхности панелей, анемометр-термометр ADA AeroTemp для измерения скорости ветра и температуры воздуха, цифровой термометр для фиксации температуры воздуха. Определение поверхностной температуры производится через регистрацию интенсивности инфракрасного излучения, что исключает необходимость контакта каких-либо элементов прибора с исследуемым объектом. Для определения температуры панелей KVAZAR измеряется температура в 9 точках на ее поверхности, не освещаемой солнцем. Каждая точка измерения должна находиться непосредственно за солнечным элементом. Для фиксации температуры батареи делается замер в 18 точках (по одной точке на панель). Такие замеры делаются для трех. Графики распределения температуры модулей по высоте и ширине, измеренной с тыльной стороны представлены на рис. 6. На рис. Представлены графики распределения температуры по ширине 1 модуля, 1 ряда, измеренной с тыльной стороны. Графики распределения температуры по ширине 1 модуля, 1 ряда, измеренной с тыльной стороны представлены на рис. 7.

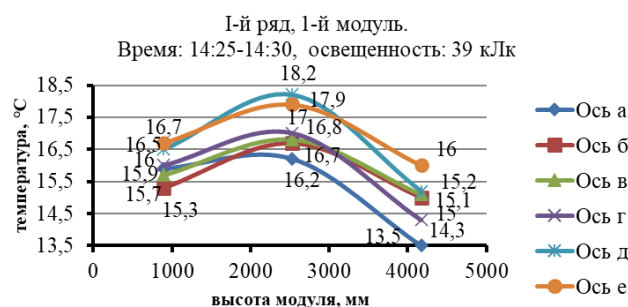


Рис. 6. Измерение температурных характеристик фотоэлектрической панели



Рис. 7. Распределение температурных характеристик фотоэлектрической панели по ширине модуля

Как видно на графиках, с увеличением высоты расположения точки измерения, темпера-

тура модулей по всем шести осям от нижней панели до средней повышается на 0,5 – 1,5 °С, а затем от средней до верхней панели снижается на 1,5 – 3 °С. Минимальная температура – 13,5 °С, максимальная – 18,2 °С. Снижение температуры обусловлено тем что северо-западный ветер сначала охлаждал с тыльной стороны верхние панели, потом, нагревшись и снизив скорость движения охлаждал средние и нижние панели с тыльной стороны. Поэтому эффективность отбора теплоты от модуля снижается со снижением высоты (т.к. скорость воздушного потока уменьшилась, а его температура увеличилась). Но при этом нижние панели имеют меньшую температуру, чем средние – поэтому можно предположить, что северо-западный ветер создал между I-м и II-м рядами модулей воздушный поток, дополнительно снижающий температуру лицевую сторону нижней панели.

Выводы

Определение энергетического потенциала фотоэлектрических панелей является важной частью проектирования солнечных станций (СЭС), т. к. неправильные расчеты характеристик могут привести к неисправной или не эффективной работе всей станции и близлежащей энергосистемы.

Сильное увеличение температурных показателей может привести не только к падению КПД панелей и как следствие снижению выработки, но и к остановке работы всей СЭС.

Одним из факторов снижения температурных показателей является наличие ветрового потока между рядами панелей, что приводит к их охлаждению и увеличению выработки электрической энергии.

В результате проведенных исследований была дана оценка по прогнозированию выработки электроэнергии солнечной фотоэлектрической станцией, а также обоснован выбор технологических режимов эксплуатации станции в зависимости от различных метеопараметров и температурных состояний фотоэлектрических модулей.

Список литературы

1. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование солнечного излучения. М. Наука. 1989. – 120 с.
2. Кучинский В.П. Методика определения тепловых характеристик фототермических модулей / В.П. Кучинский, Н.П. Сеницын, А.Н. Суржик,

- В.И. Шевчук // Возобновляемая энергетика, 2006. – № 4. – С. 44 - 47.
3. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У.А. Бекман. – М: Мир, 1988. – 413 с.
4. Арбузов Ю.Д. Основы фотоэлектричества / Ю. Д. Арбузов, В.М. Евдокимов – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
5. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции по температуре и облученности результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 24 с. – (Национальный стандарт России).
6. Vologdin S. V., Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Abd Ali L. M., Kakushina E. G., Al Barmani A. G., Al-Rufae F. M. / Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta // Appl. Sol. Energy 55, Issue 4, pp. 229–234 (2019).
7. Guryev, V. V., Yakimovich, B. A., Abd Ali, L. A., & Al Barmani, A. G. / Improvement of Methods for Predicting the Generation Capacity of Solar Power Plants: the Case of the Power Systems in the Republic of Crimea and City of Sevastopol // Applied Solar Energy 55, Issue 4, pp. 242-246 2019.
8. A. Voskanyan, D.F.Borden B.A Yakimovich, A.G. Albairmani. Studies of the Operation of a Solar Power Plant. Applied Solar Energy 55, Issue 4, pp. 235-241 (2019).
9. Kuznetsov, N. P., Abd Ali, M. L., Kuvshinov, V. V., Issa, A. H., Mohammed, J. H., & Al-bairmani, G. A. [2020]. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading. Journal of Applied Engineering Science, 18(3), 313 – 320, 2020.
10. Аль Баирмани А.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Богдан Д.Ф. Использование связанных с сетью инверторов (Grid-tie) при производстве электроэнергии солнечными панелями, международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2020»– Севастополь: СевГУ, 2020.

References

1. Andreev V.M. Photoelectric conversion of solar radiation. M. Science. 1989. – 120 p.
2. Kuchinsky V.P. Methodology for determining the thermal characteristics of photothermal modules / V.P. Kuchinsky, N.P. Sinitsyn, A.N. Surzhik, V.I. Shevchuk // Renewable Energy, 2006. – No. 4. – С. 44 - 47.
3. Duffy J. A. Thermal processes using solar energy / J. A. Duffy, W. A. Beckman. – М: Mir, 1988. – 413 p.

4. Arbuzov Yu. D. Fundamentals of photoelectricity / Yu. D. Arbuzov, V. M. Evdokimov - M.: GNU VIE-SKh, 2007. - 292 p.
5. Photovoltaic devices made of crystalline silicon. Method of correction for temperature and irradiance of the results of measuring the current-voltage characteristic (IEC 891-87): GOST 28976-91. – [Input. 04/19/91]. – M.: IPK Publishing House of Standards, 2004. – 24 p. – (National Standard of Russia).
6. Vologdin S. V., Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Abd Ali L. M., Kakushina E. G., Al Barmani A. G., Al-Rufae F. M. / Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta // Appl. Sol. Energy 55, Issue 4, pp. 229–234 (2019).
7. Guryev, V. V., Yakimovich, B. A., Abd Ali, L. A., & Al Barmani, A. G. / Improvement of Methods for Predicting the Generation Capacity of Solar Power Plants: the Case of the Power Systems in the Republic of Crimea and City of Sevastopol // Applied Solar Energy 55, Issue 4, pp. 242-246 2019.
8. A. Voskanyan, D. F. Borden, B. A Yakimovich, A. G. Albairmani. Studies of the Operation of a Solar Power Plant. Applied Solar Energy 55, Issue 4, pp. 235-241 (2019).
9. Kuznetsov, N. P., Abd Ali, M. L., Kuvshinov, V. V., Issa, A. H., Mohammed, J. H., & Al-bairmani, G. A. [2020]. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading. Journal of Applied Engineering Science, 18(3), 313 – 320, 2020.
10. Al Bairmani A.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Bogdan D.F. The use of grid-connected inverters (Grid-tie) in the production of electricity from solar panels, international scientific and practical conference “Environmental, industrial and energy safety - 2020” – Sevastopol: SevGU, 2020.

УДК 620.92

Методика расчета эффективности работы гелиоприемных устройств

Н.А. Власов, И.С. Ивантеев, А.Н. Фролова, М.Р. Меджитов, Р.А. Нашев

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, Mr.asphodel@mail.ru

Статья поступила 28.11.2023 г.; после доработки 29.11.2023 г

Аннотация

Определение энергетических характеристик солнечных установок имеет важную особенность, которая зависит от множества факторов, одним из которых является атмосферная зависимость и другие климатические факторы, влияющие на работу приёмных поверхностей гелиоустановок. Для расчетов параметров была использована методика определения некоторых коэффициентов, которые изменяются из-за атмосферных факторов.

Ключевые слова: коэффициент преобразования, атмосферная масса, гелиотехника, фотоэлектрические преобразователи, трекерные системы слежения, коэффициент прозрачности.

Method for calculating the operation efficiency of solar reception Devices

N.A. Vlasov, I.S. Ivanteev, A.N. Frolova, M.R. Medzhitov, R.A. Nashev

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, Mr.asphodel@mail.ru

Received 28.11.2023 y.; received in final form 29.11.2023 y

Abstract

Determining the energy characteristics of solar installations has an important feature, which depends on many factors, one of which is atmospheric dependence and other climatic factors affecting the operation of the receiving surfaces of solar installations. To calculate the parameters, a technique was used to determine some coefficients that change due to atmospheric factors.

Key words: conversion coefficient, atmospheric mass, solar technology, photoelectric converters, tracker tracking systems, transparency coefficient.

Введение

Работа энергетических солнечных установок сильно зависит от климатических факторов. В результате непостоянства потока солнечной радиации энергетический выход некоторых, особенно фотоэлектрических систем оказывается неэффективным. В результате себестоимость таких устройств и затраты на их обслуживание значительно превышают аналогичные для систем традиционной энергетики. Энергетический вы-

ход солнечных установок определяется различными факторами. Например, солнечной инсоляцией, атмосферной массой, коэффициентом прозрачности атмосферы и др.

Данная работа является продолжением теоретических исследований, проводимых мировыми учеными по исследованию зависимости числа атмосферных масс от зенитного расстояния и параметров окружающей среды. Предыдущие работы [1-3] делали акцент на получение полиномиальных зависимостей для интерполяции

опытных данных, полученных для расчета астрономической рефракции [4-6]. Особенностью данной работы является получение формулы, основанной на аналитической зависимости пути солнечного луча в атмосфере от величины зенитного угла и эмпирическом значении эффективной толщины атмосферы [7-10].

Получение наиболее эффективных значений, определяющих коэффициент преобразования потока солнечной радиации гелиосистемами или фотоэлектрическими преобразователями на этапе теоретических расчетов, позволяет в итоге значительно увеличить эффективность энергетического выхода солнечных систем в зависимости потока радиации.

Постановка цели и задач научного исследования

Одной из важной составляющих анализа эффективности использования гелиоприемных устройств является учет доли солнечной радиации, поглощаемой атмосферой. Полиномиальные зависимости, используемые в настоящее время для расчета атмосферной массы, требуют сложных вычислений и как следствие снижают скорость и качество проводимых расчетов. Получение более простых и точных формул для расчета атмосферной массы позволит расширить круг исследований в области использования гелиоприемных устройств. Все это позволяет вывести формулу значения атмосферной массы на основании аналитической зависимости длины пути солнечного луча от зенитного угла и результатов численного моделирования по определению эффективной толщины атмосферы.

Получение теоретических решений для определения параметров солнечной энергии гелиоустройствами позволяет еще на стадии проектирования их конструкции заложить эффективные характеристик рабочих поверхностей абсорберов и получить качественные установок для преобразования.

Результаты исследований

Одним из важных факторов влияющим на эффективности работы гелиоприемных устройств является рассеяние и поглощение солнечного излучения атмосферой. Чем ближе находится Солнце к горизонту, тем больший путь надо пройти лучу в атмосфере, тем больше потери на поглощение и рассеяние. Например, при зенитном расстоянии Солнца 60° масса атмосферы равна 2. Это означает, что солнечные

лучи проходят воздушную массу в 2 раза большую, чем при положении Солнца в нулевом зените, а при положении Солнца на горизонте ($z=90^\circ$) масса воздуха увеличивается в 35 раз [1].

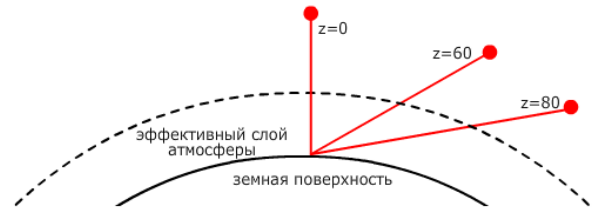


Рис. 1. Длина пути солнечного луча в атмосфере при разных зенитных углах

Плотность интегрального потока солнечной радиации (по всем длинам волн), достигшей поверхности Земли определяется формулой:

$$S = S_0 \cdot P^m(z) \quad (1)$$

где S_0 — солнечная постоянная, P — коэффициент прозрачности, осредненный для интегрального потока; m — масса атмосферы, (или число масс атмосферы) представляет собой отношение оптической толщины атмосферы, проходимой солнечными лучами при зенитном угле Z , к оптической толщине, проходимой лучами при зенитном угле равном нулю (вертикальное падение лучей).

Коэффициент прозрачности атмосферы P при среднем состоянии ее замутнения равен примерно 0,8; высоко в горах он может достигать 0,9. При большой мутности атмосферы (дымка, туман, мгла и т. п.) P уменьшается до 0,6 и меньше. При наличии облаков, когда диск Солнца становится невидимым, коэффициент прозрачности для прямых солнечных лучей равен 0.

Основная трудность в проведении расчетов по формуле (1) заключается в определении значения массы атмосферы как функции зенитного угла.

Первыми, кто заинтересовался проблемой прохождения лучей через атмосферный слой, были астрономы. Лучи идущие от небесных светил преломлялись атмосферой, следовательно, для определения их точного положения приходится вводить поправку за отклонение луча в земной атмосфере. Явление преломления лучей света, идущих от небесных светил, получило название «астрономическая рефракция». Астрономическая рефракция ρ зависит от зенитного

угла, а также от температуры и давления воздуха. Для ее вычисления используют специальные таблицы, полученные в результате опытных наблюдений. Определив по таблицам значение рефракции, вычисляют значение массы атмосферы по формуле Бемпорада:

$$m = \frac{\rho}{58.36''} \cdot \sec Z \quad (2)$$

где ρ – астрономическая рефракция, Z – зенитный угол.

Для значений зенитных углов меньших 750 достаточно достоверные результаты дает простая формула:

$$m = \sec Z$$

Таблицы рефракции содержат более 600 значений, поэтому их трудно использовать в практических расчетах атмосферной массы при значениях зенитного угла больше 750. Можно представить табличные значения каким-нибудь полиномом, но мы рассмотрим метод, позволяющий получить аналитическую зависимость атмосферной массы от зенитного угла.

По определению масса атмосферы равна отношению длины пути луча L к эффективной толщине атмосферы h_{atm} .

$$m = \frac{L}{h_{atm}} \quad (3)$$

Следовательно, для нахождения m нам необходимо выразить длину пути луча через функцию от зенитного угла и определить значение эффективной толщины атмосферы. Для решения первой задачи выразим путь луча через вектор.

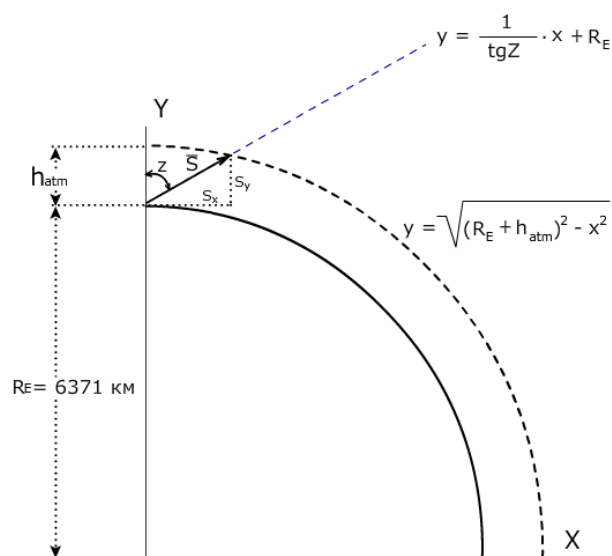


Рис 2. Модель для получения аналитической зависимости массы атмосферы от величины зенитного угла

Длину пути луча в атмосфере можно рассчитать как модуль вектора S :

$$L = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$$

$$\text{так как } s_y = \frac{1}{\operatorname{tg} Z} \cdot s_x, \text{ то}$$

$$L = s_x \cdot \sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 Z} + 1} = s_x \cdot \frac{1}{\sin Z} = s_x \cdot \csc Z \quad (4)$$

Выразим проекцию S_x через радиус Земли, высоту атмосферы и зенитный угол. Точка пересечения луча с границей атмосферы принадлежит кругу атмосферы и линии похождения луча. Мы сможем найти S_x через общее решение уравнений этих геометрических объектов.

Уравнение круга поверхности атмосферы:

$$y = \sqrt{(R_E + h_{atm})^2 - x^2} \quad (5)$$

где R_E – радиус Земли.

Уравнение прямой на которой лежит вектор солнечного луча:

$$y = \frac{1}{\operatorname{tg} Z} \cdot x + R_E \quad (6)$$

возведем в квадрат и приравняем выражения (5) и (6)

$$R_E^2 + 2 \cdot R_E \cdot h_{atm} + h_{atm}^2 - x^2 = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 Z} \cdot x^2 + \frac{2 \cdot R_E}{\operatorname{tg} Z} \cdot x + R_E^2$$

отнимем из правой части левую часть:

$$\left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2 Z} + 1 \right) \cdot x^2 + \frac{2 \cdot R_E}{\operatorname{tg} Z} \cdot x - (2 \cdot R_E \cdot h_{atm} + h_{atm}^2) = 0$$

Это квадратное уравнение вида $a \cdot x^2 + b \cdot x - c = 0$, где

$$a = \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2 Z} + 1 \right) = \frac{1}{\sin Z} = \csc Z,$$

$$b = \frac{2 \cdot R_E}{\operatorname{tg} Z},$$

$$c = 2 \cdot R_E \cdot h_{atm} + h_{atm}^2$$

Уравнение имеет два решения, для нашей задачи нужно значение X с максимальным значением:

$$x = \frac{\sqrt{R_E^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 Z + \csc^2 Z \cdot (2 \cdot R_E \cdot h_{atm} + h_{atm}^2)} - R_E \cdot \operatorname{ctg} Z}{\csc^2 Z}$$

(7)

Подставив выражение X в (4) и разделив получившуюся дробь на $\csc Z$, получаем:

$$L = \sqrt{R_E^2 \cdot \cos^2 Z + 2 \cdot R_E \cdot h_{atm} + h_{atm}^2} - R_E \cdot \cos Z$$

или

$$L = \sqrt{(R_E + h_{atm})^2 - R_E^2 \cdot \sin^2 Z} - R_E \cdot \cos Z \quad (8)$$

подставив выражение L в (3), получаем

$$m = \frac{R_E}{h_{atm}} \sqrt{\cos^2 Z + 2 \cdot \frac{h_{atm}}{R_E} + \left(\frac{h_{atm}}{R_E}\right)^2} - \frac{R_E}{h_{atm}} \cdot \cos Z$$

или

$$m = \frac{R_E}{h_{atm}} \cdot \left(\sqrt{\cos^2 Z + 2 \cdot \frac{h_{atm}}{R_E} + \left(\frac{h_{atm}}{R_E}\right)^2} - \cos Z \right) \quad (9)$$

Подобная формула была получена Шонбергом еще в 1929 году. В отличие от метода, приведенного в данной работе, он использовал модель из нескольких прямоугольных треугольников.

Формула (9) не может быть использована в практических расчетах, если неизвестно значение эффективной высоты атмосферы. Примечательным фактом в исследовании данной темы является то, что ученые не стали искать это значение, а направили свои усилия на поиски полиномов, которые наилучшим образом интерполировали табличные данные Бемпорада, полученные опытным путем.

Первые попытки давали хорошее приближение для значений зенитного угла не превышающих 850, но в диапазоне от 850 по 900 атмосферная масса принимала отрицательное значение. Такие неудачные зависимости были предложены:

1. Харди в 1962 году [3]:

$$m = \sec Z - 0.0018167 \cdot (\sec Z - 1) - 0.002875 \cdot (\sec Z - 1)^2 - 0.0008083 \cdot (\sec Z - 1)^3$$

2. Янгом и Ирвином в 1967:

$$m = \sec Z \cdot [1 - 0.0012 \cdot (\sec^2 Z - 1)]$$

В конце XX века рядом ученых были предложены зависимости, которые хорошо согласовывались с опытными данными во всем диапазоне значений зенитного угла:

1. Кастен и Янг в 1989 [4]:

$$m = \frac{1}{\cos Z + 0.50572 \cdot (96.07995 - Z)^{-1.6364}}$$

2. Янг в 1994 [5]:

$$m = \frac{1.002432 \cdot \cos^2 Z + 0.148386 \cdot \cos Z + 0.0096467}{\cos^3 Z + 0.149864 \cdot \cos^2 Z + 0.0102963 \cdot \cos Z + 0.000303978}$$

3. Пикеринг в 2002 [6]:

$$m = \sin \left[(90 - Z) + 244 / (165 + 47 \cdot (90 - Z)^{1.1}) \right]^{-1}$$

Если рассмотреть внимательнее проблему поиска оптимального полинома для расчета атмосферной массы, то оказывается очевидным, что этот поиск не имел смысла. Простым и эффективным путем был простой перебор возможных значений эффективной высоты атмосферы, для нахождения такого числа, которое давало бы минимальное расхождение аналитической зависимости (9) с результатами, полученными по формуле (2), основанной на табличных значениях.

Другими словами, необходимо найти такое значение h_{atm} при котором разница значений (9) и (2) стремится к нулю на всем диапазоне значений зенитного угла:

$$\frac{R_E}{h_{atm}} \cdot \left(\sqrt{\cos^2 Z + 2 \cdot \frac{h_{atm}}{R_E} + \left(\frac{h_{atm}}{R_E}\right)^2} - \cos Z \right) - \frac{\rho}{58.36''} \cdot \sec Z = 0$$

В данной работе провели ряд оценочных вычислений, из которых были получены значение эффективной высоты атмосферы равное 10 км.

Заменив в формуле (9) величины R_E и h_{atm} соответственно на числа 6731 и 10, получаем простую формулу для расчета атмосферной массы как функции от зенитного угла:

$$m = 637.1 \cdot \left(\sqrt{\cos^2 Z + 0.0031417} - \cos Z \right) \quad (10)$$

Кроме простоты вычисления формула (10) имеет физический смысл, что нельзя сказать о виртуальных полиномах.

На рисунке приведены графики значений атмосферной массы, полученные по формуле (10) и с помощью полиномов.

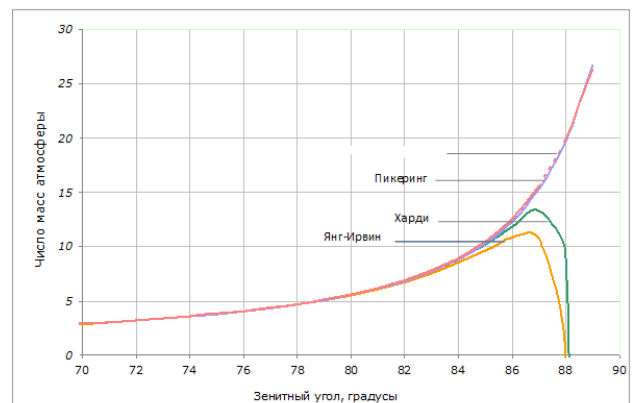


Рис. 3. Интерполяционные зависимости числа атмосферных масс от зенитного угла

Графики показывают, что формула 10 дает точные результаты на всем диапазоне значений зенитного угла и может использоваться в практических вычислениях атмосферной массы. Сравнительный анализ различных интерполяционных зависимостей значений атмосферной массы от зенитного угла показал, что эта формула может использоваться в практических вычислениях атмосферной массы. Предлагается использовать данную формулу при исследовании эффективности использования следящих гелиоприемных устройствах (гелиотрекеров) в различных точках земного шара.

В данной работе были получены аналитическая и интерполяционная зависимость атмосферной массы от значений зенитного угла. Полученные результаты отличаются от существующих полиномиальных выражений лучшей точностью и простотой использования. Для получения новых выражений были применены математические методы векторной алгебры и аналитической геометрии. Наиболее интересным применением новых зависимостей являются вопросы исследования эффективности следящих гелиоприемных панелей. Применение найденной формулы позволит расширить область анализа использования гелиоприемных устройств в различных условиях. Сложные выражения и зависимости атмосферной массы, которые были полученные предыдущими исследователями, удалось заменить простым и логичным аналитическим выражением.

Выводы

Получение необходимых параметров для расчета гелиотехнических установок является важным этапом для конструирования и производства солнечных электрогенерирующих систем и тепловых гелиоколлекторов.

При использовании полученных в результате проведенной работы данных возможно производить более точные расчеты энергетических характеристик приемных панелей фотоэлектрических модулей и абсорберов тепловых гелиоколлекторов. При комбинированной выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности полученные теоретические расчеты позволяют повысить коэффициент преобразования энергии.

Использование новой методики расчетов гелиосистем позволяет значительно экономить временные и технологические затраты для производства единицы продукции, а также помогает в сокращении издержек на производство.

Список литературы

1. Куликов К.А. Курс сферической астрономии. — Москва. Издательство «Наука», 1969, 216 стр.
2. Schoenberg, E. 1929. Theoretische Photometrie, g) Über die Extinktion des Lichtes in der Erdatmosphäre. In Handbuch der Astrophysik. Band II, erste Hälfte. Berlin: Springer.
3. Hardie, R. H. 1962. In Astronomical Techniques. Hiltner, W. A., ed. Chicago: University of Chicago Press, 184–. LCCN 62009113.
4. Kasten, F., and A. T. Young. 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. Applied Optics 28:4735–4738
5. Young, A. T. 1994. Air mass and refraction. Applied Optics. 33:1108–1110. doi: 10.1364/AO.33.001108. Bibcode 1994ApOpt..33.1108Y
6. Pickering, K. A. 2002. The Southern Limits of the Ancient Star Catalog. DIO 12:1, 20, n. 39.
7. Баранов В. К. Новые концентраторы излучения и перспективы их применения в оптике и гелиотехнике / В. К. Баранов // Труды Государственного оптического института. — С.-Петербург, 1979. — Т. 45, вып. 179. — С. 57 - 70.
8. Захидов Р. А. Теория и расчёт гелиотехнических концентрирующих систем / Захидов Р. А., Умаров Г. Я., Вайнер А. А. — Ташкент: ФАН, 1977. — 300 с.
9. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман. — М: Мир, 1988. — 413 с.
10. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов / Колтун М. М. — М.: Наука, 1985. — 300 с.

References

1. Kulikov K.A. Course of spherical astronomy. - Moscow. Publishing house "Science", 1969, 216 pp.
2. Schoenberg, E. 1929. Theoretische Photometrie, g) Über die Extinktion des Lichtes in der Erdatmosphäre. In Handbuch der Astrophysics. Band II, erste Hälfte. Berlin: Springer.
3. Hardie, R. H. 1962. In Astronomical Techniques. Hiltner, W. A., ed. Chicago: University of Chicago Press, 184–. LCCN 62009113.
4. Kasten, F., and A. T. Young. 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. Applied Optics 28:4735–4738
5. Young, A. T. 1994. Air mass and refraction. Applied Optics. 33:1108–1110. doi: 10.1364/AO.33.001108. Bibcode 1994ApOpt..33.1108Y
6. Pickering, K. A. 2002. The Southern Limits of the Ancient Star Catalog. DIO 12:1, 20, n. 39.
7. Baranov V.K. New radiation concentrators and prospects for their application in optics and solar technology / V.K. Baranov // Proceedings of the State Optical Institute. — St. Petersburg, 1979. — T. 45, issue. 179. — pp. 57 - 70.

-
8. Zahidov R. A. Theory and calculation of solar concentrating systems / Zahidov R. A., Umarov G. Ya., Vainer A. A. - Tashkent: FAN, 1977. - 300 p.
 9. Duffy J. A. Thermal processes using solar energy / J. A. Duffy, W. A. Beckman. – M: Mir, 1988. – 413 p.
 10. Koltun M. M. Optics and metrology of solar cells / Koltun M. M. - M.: Nauka, 1985. - 300 p.

УДК 620.92

Геотермальная энергетика для теплоснабжения потребителей Крыма

Р.А. Нашев, А.Н. Фролова, А.С. Жильцов, А.Д. Касницкий, А.С. Владимиров
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053,
Россия, bo_zemlya_zdoroviya@mail.ru

Статья поступила 28.11.2023 г.; после доработки 29.11.2023 г.

Аннотация

Для обеспечения автономного потребителя электрической и тепловой энергией в регионах с большим тепло геотермальным потенциалом наиболее эффективно использовать геотермальную энергию подземных недр Земли. Были проведены исследования теплового потенциала термальных вод Крыма и проведен выбор основного и вспомогательного оборудования для работы геотермальной энергетической системы на крымском полуострове.

Ключевые слова: геотермальная энергетика, возобновляемые источники энергии, термальные воды, энергоэффективность, теплообменник.

Geothermal energy for heat supply to Crimean consumers

R.A. Nashev, A.N. Frolova, A.S. Zhiltsov, A.D. Kasnitsky, A.S. Vladimirov.
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, bo_zemlya_zdoroviya@mail.ru

Received 28.11.2023 y.; received in final form 29.11.2023 y

Abstract

To provide autonomous consumers with electrical and thermal energy in regions with large geothermal potential, it is most effective to use the geothermal energy of the Earth's underground bowels. Research was carried out on the thermal potential of the thermal waters of Crimea and the selection of main and auxiliary equipment for the operation of the geothermal energy system on the Crimean Peninsula was carried out.

Key words: geothermal energy, renewable energy sources, thermal waters, energy efficiency, heat exchanger.

Введение

На данном этапе развития мирового сообщества особое место уделяется созданию баланса экономических и экологических составляющих планеты. При этом определено, что одним из источников экологически устойчивой энергетики являются возобновляемые источники энергии.

Различные типы возобновляемых источников энергии используются по-разному и при реализации проектов возникают барьеры, как технико-экономического, так и законодательного характера, что предполагает формирование системного подхода к освоению технологий возобновляемой энергетики.

Развитие геотермальной энергетики не является исключением. Учитывая большой энергетический потенциал, поставлена задача наиболее эффективного использования геотермальных ресурсов. При этом Международные геотермальные организации, признавая этот факт, особое внимание уделяют отношению государств, обладающих достаточными геотермальными ресурсами, к созданию условий развития технологий стабилизации энергетической отрасли при сохранении экологии.

Россия является страной, где для прямого теплоснабжения, горячего водоснабжения и бальнеологических целей, в южных регионах

могут быть использованы геотермальные ресурсы, которые выходят на поверхность в различных гидрогеологических условиях, с различными показателями дебита, температуры, глубины залегания и близости к местам потенциального использования. Освоение геотермальной энергии обладает существенными преимуществами. Это наличие нефтяных и газовых разведочных скважин, информационная база, что в едином использовании может значительно снизить затраты и риски освоения геотермальной энергии. Внедрение геотермальных проектов в сфере жилищно-коммунальной сферы способствует значительному снижению загрязнения окружающей среды, а также выбросов парниковых газов.

Постановка задачи

Геотермальная энергия—это энергия внутренних областей Земли. Наглядный этому пример, извержение вулканов, что свидетельствует тысячам градусов Цельсия жара внутри нашей планеты. Постепенно продвигаясь от ядра земли к земной коре, температура снижается, и становится пригодной для использования ее, как геотермальной энергии.

Самая распространенная форма — это горячая вода, чтобы использовать эту энергию, изобутан переводят в парообразное состояние, используя его для вращения турбины (рис.1).

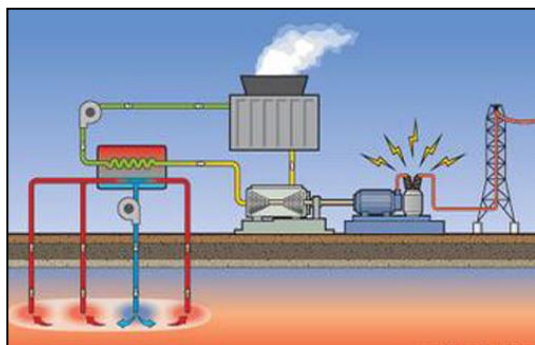


Рис. 1. Добыча энергии из земли

Теплота нашей планеты. Температура достигает таких пределов, что камни начинают плавиться и выступает жидкая магма, так же от предельной температуры внутренних недр земли нагреваются грунтовые воды (рис. 2).

Грунтовые воды, пробиваясь к поверхности земли образуют гейзеры и источники тепла. Данные источники тепла используются как получения электрической энергии, так и для прямого назначения.

Извлечение геотермальной энергии не требует больших затрат, если она находится в нескольких метрах от грунта, извлечь ее можно при помощи неглубоких скважин.



Рис. 2. Геотермальная тепловая электростанция

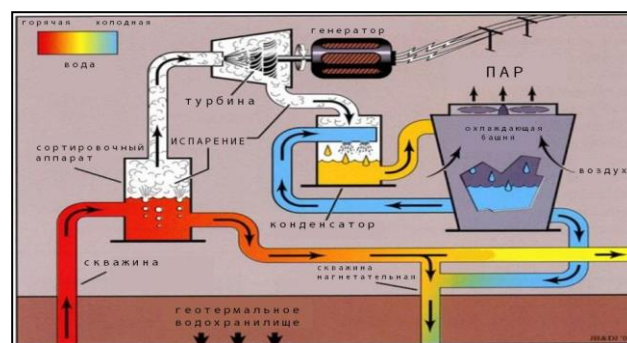


Рис.3. Схема геотермальная тепловая электростанция

Основное направление развития геотермальной энергетики — отбор теплоты не только термальных вод, но и водовмещающих горных пород путем закачки отработанной воды в пласты, преобразование глубинной теплоты в электрическую энергию. Такое использование глубинной теплоты обеспечит экологическую безопасность.

Геотермальные ресурсы Крыма

В недрах Крымского полуострова выявлены термальные воды, прогнозные ресурсы которых оценены в количестве 85 тыс. м³/сутки, с тепловой энергией 1450 тыс. Гкал. в год и температурой 40-70°C (насосный способ эксплуатации). При эксплуатации их с применением геотермальных систем теплоэнергетический потенциал термальных вод оценивается более чем в 107 Гкал в год, с общей энергетической мощностью более 1000 МВт. На наиболее перспективных площадях: Новоселовской (Сакский район,

юг Первомайского района), Октябрьской (Красногвардейский, Симферопольский р-ны), Северо-Сивашской (Джанкойский район) в настоящее время проведены поисково-разведочные работы на термальные воды. Скважинами глубиной 1100-2300 м на площади около 1500 кв. км выявлены термальные воды с температурой на изливе 46-85° и начальными дебитами скважин 1500-5000 м³/сутки. На этих площадях успешно испытаны геодинамические системы (ГДС) в с.с. Ильинка, Сизовка, Трудовое Сакского района, с.с.Медведевка Джанкойского района, с.с. Янтарное, Котельниково, Новоалексеевка, Ровное Красногвардейского района.

Для Крыма актуальной остается не только проблема энергообеспечения, но и сохранения уникальных природных лечебных богатств полуострова. В связи с этим, возобновляемые источники энергии, ежегодные рекомендуемые объемы использования которых составляют около 570 тыс. т у.т., являются экономически выгодным продуктом, обеспечивающим энергетическую безопасность и снижение вредного влияния на окружающую среду. Целью настоящей

научно-технической работы является формирование обобщающего материала в сфере геотермальной энергетики Крыма по определению устойчивых выгод производства геотермальной энергии как экологически благоприятного энергетического источника. Результаты работы могут быть рассмотрены как составляющая при подготовке международных геотермальных проектов в Крыму.

Температурная зависимость увеличивается с глубиной скважин. Например, на глубине 2000 м температуры изменяются от 60 до 110 °С. (табл. 1). Зоны высоких температур приурочены к Новоселовскому поднятию, северо-западу Тарханкута (скв. 1 Бакальская – 111 °С), в меньшей степени к Керченскому полуострову. Минимальные температуры фиксируются в Северном Причерноморье и Горном Крыму. В Равнинном Крыму четко прослеживается температурный минимум в Орловско-Серебрянско-Донузлавской зоне.

Таблица 1 Сведения о геотермических условиях Крымского полуострова

№№ п/п	Скважина	Температура на глубине, °С					
		1000 м	1500 м	2000 м	2500 м	3000 м	4000 м
1	Алексеевская	54	75	96	117	138	180
2	Октябрьская	42	58	73	88	103	133
3	Ильинская	51	70	90	103	115	140*
4	Краснопольская	46	63	80	97	114	148
5	Нижегорская	48	68	82	96	106*	
6	Октябрьская	44	60	76	91	107	
7	Южно-Сивашская	46	63	80	97	113	

На глубине 4000 м максимальные значения температуры отмечены на Керченском полуострове в скв. 4 Алексеевская – 180 °С. (рис. 4). На западе Тарханкута температура, очевидно, превышает 170 °С, т.к. в скв. 17- Бакальская она равна 165 °С и при дальнейшем продвижении вглубь зоны АВПД следует ожидать ее рост. Минимальное значение температуры в Джанкойско-Донузлавской зоне зафиксировано в скв. 1 Крестьяновская – 125 °С. Замеров температуры на Новоселовском поднятии нет, но можно с достаточной уверенностью предположить наличие здесь температуры превышающие 170-175 °С. Таким образом, на территории Равнинного Крыма присутствуют термальные воды низкопотенциальные с температурой 35-70 °С, среднепотенциальные (70-100°С) и высокопотенциальные (более 100 °С). Кроме того, на северо-западе Тар-

ханкутского полуострова и на Керченском полуострове воды отложений нижнего мела значительно перегреты (более 200 °С).

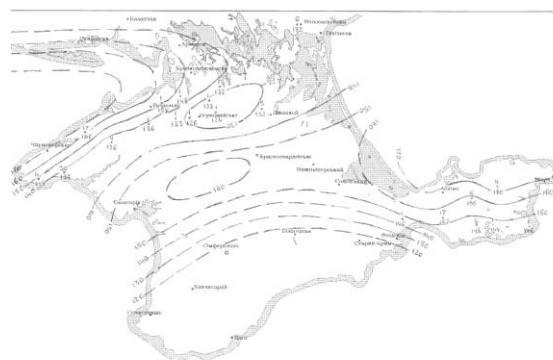


Рис. 4. Геотермическая карта по поверхности среза глубины 4000 м Крымского полуострова

Обзорно-аналитические данные поисково-разведочных работ, научные исследования и разработки по проблемам геотермальной энергетики рассмотрены на предмет идентификации месторождений с достаточными запасами геотермальной энергии для практических разработок в промышленных масштабах (рис. 5).

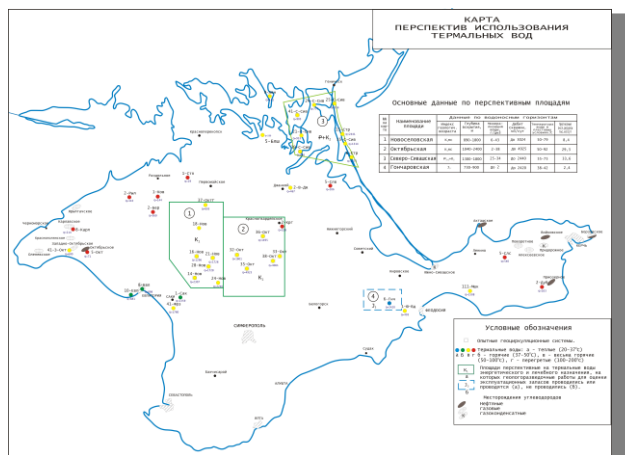


Рис. 5. Карта термальных вод Республики Крым

Результаты исследований

На современном этапе перспективность использования теплоэнергетического потенциала геотермальных вод в сфере топливно-энергетического комплекса Крыма потребовало провести ревизию оборудования в рамках полевого обследования, это вызвано еще и тем фактом, что скважины, вскрывшие термальные воды, были пробурены в 70-90 г.г. прошлого столетия и надлежащего контроля за их техническим состоянием не осуществлялось, были определены основные задачи полевого обследования, в том числе:

- наличие на местности скважин;
- техническое состояние скважин;
- уточнение наличия необходимой технической инфраструктуры (обвязка скважин, наличие котельных и т.д.);
- уточнение наличия возможного потребителя тепловой энергии.

В Крыму. было проведено полевое обследование скважин районов степного Крыма. результаты обследования приведены ниже.

Исследование скважин

Скважины 14, 20 Новоселовское расположены на южной окраине села на пустыре (рис. 6), устье скважин находятся в хорошем техническом состоянии. В 250-300 м расположена действующая котельная школы. других потребите-

лей тепловой энергии нет. ориентировочное потребление тепла 0,5 МВт/час, что позволяет их использование для отопления школы.



Рис. 6. Скважина 14 (слева) и 20 (справа), с. Новоселовское.

Представленные скважины позволяют обеспечивать тепловой энергией конкретный объект, при этом полученная тепловая энергия может аккумулироваться и использоваться для других потребителей.

Дрогой объект – это скважина 29 расположенная на южной окраине села Зерновое (рис. 7), скважина 28 в центре села (рис. 6.3). рядом с ней расположена котельная (рис. 2.11). оборудование демонтировано. скважины обвязаны тепло-трассой с котельной. техническое состояние скважин удовлетворительное. необходимо провести замену фонтанной арматуры.



Рис. 7. Скважина 28 (слева) и 29 (справа), с. Зерновое.

Потенциальными потребителями тепловой энергии могут рассматриваться: школа, детский сад, здание сельсовета и несколько жилых зданий. для их обогрева необходимо тепловой мощности 0,7-0,9 МВт.

Рассмотрим другие скважины, которые расположены на северо-восточной окраине села Котельниково. скважина 32 октябрьская законсервирована с установкой цементного моста в интервале 0-50 м (рис. 8, слева), техническое состояние скважины 32-д неудовлетворительное (рис.

8, справа). необходимо провести ремонт устьевого оборудования. скважины соединены с центром села теплотрассой, состояние которой удовлетворительное. котельная разрушена. ориентировочная тепловая мощность скважин 1,0-1,2 МВт, потенциальными потребителями тепловой энергии являются административные здания, клуб и жилые дома.



Рис. 8. Скважина 32 (слева) и 32-д (справа), с. Котельниково.

Основной исследуемый объект на территории Крымского полуострова является с. Янтарное, в котором расположен действующий тепловой геотермальный пункт. Скважины 36 и 36-д расположены на северо-западной окраине села с. Янтарное, рядом с теплицей, техническое состояние скважины 36 неудовлетворительное, скважины 36-д удовлетворительное (рис. 9). необходимо провести ремонтные работы и заменить устьевое оборудование. рядом со скважиной расположен тепловый пункт (рис. 10), где находится теплообменник и насосы для закачки. потенциальное потребление тепловой энергии 3,0-3,5 мвт/час.



Рис. 9. Скважина 36-д с. Янтарное

Одной из задач исследовательской работы было проведение энергетического расчета предложенного теплового пункта.

Расчёт геотермального теплового пункта системы теплоснабжения. Село Янтарное в Крыму (Красногвардейский район).



Рис. 10. Действующий тепловой пункт в селе Янтарное

Приведём описание опытно - промышленного образца типового геотермального пункта в п. Янтарное (рис. 10).

В Крыму имеются термальные воды различных природных кондиций. Для целей теплоснабжения применяются воды с $t = 56^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$. В настоящее время наиболее освоенными и испытанными является 2 схемы использования ГТТ:

- с пиковыми котельными;
- прямого использования.

В 1990 – 1991 г.г. на этом месторождении были пробурены две скважины №36 М и №36 Д. В них были проведены глубинные замеры давления и температуры (табл. 2).

Таблица. 2

Н, м	500	1000	1500	1895
Р, МПа	6,4	11,1	16,0	19,8

Температура теплоносителя на максимальной глубине составила 88°C .

Здесь была впервые реализована прямого использования. Технологическая схема системы термального теплоснабжения приведена на рис. 11.

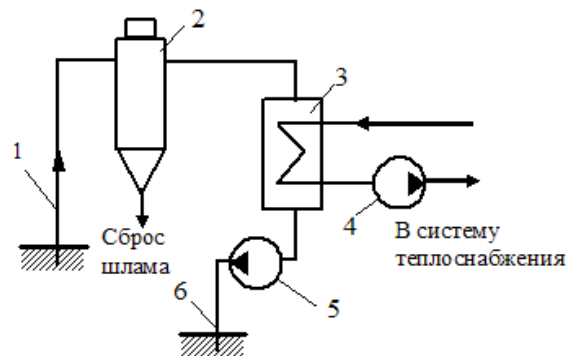


Рис. 11. Схема системы геотермального теплоснабжения в п. Янтарное:

1- подъемная скважина; 2 – гидроциклон; 3 – теплообменник; 4 – циркуляционный насос; 5 – нагнетательный насос; 6 – реинжекционная скважина.

С подъёмной скважины теплоноситель 1 поступает в гидроциклон 2, где происходит очистка от посторонних примесей которые периодически сбрасываются через вентиль в виде шлама. После очистки теплоноситель через счётчик поступает в систему теплообменников 3 и после охлаждения поступает на всас одного из нагнетательных насосов 5, который и закачивает его в нагнетательную скважину 6. Тепловой пункт оборудован пластинчатыми теплообменниками 3. Циркуляция теплоносителя во втором контуре осуществляется насосом 4, который подаёт его в систему отопления и горячего водоснабжения. С системы отопления и теплоснабжения, теплоноситель через счётчик поступает в систему теплообменников. Для промывки подъёмной и нагнетательной скважины имеются задвижки.

Статическое давление на устье скважины равно 1,2 МПа. Линия нагнетания испытана при давлении 4,5 Мпа.

Шлам собирается в специальных ангарах (ямах) около каждой скважины.

Регулируя расход термальной воды, удалось выйти на стабильный режим работы ГЦС и установлен оптимальный режим работы (рис. 11).

Технические характеристики геотермального теплопункта в п. Янтарное следующие:

Теплопроизводительность, МВт	4,1
блок отопления	3,5
блок ГВС	0,6
Температура термальной воды, °С	85
Дебит скважины, м ³ /час	60
Годовой отпуск теплоты, МВт · ч	22800
Доля в годовом отпуске от геотермального источника, %	100
Годовая экономия топлива, т.у.т.	2500

В зимний период ГТП полностью работает на отопление, а ГВС осуществляется в летний период, при этом для условий месторождения Янтарное контроль показал отсутствие отложений солей.

В настоящий момент на тепловой пункт разработана проектно-конструкторская документация и согласовано его изготовление на заводах г. Суммы и Киева. Предусматривается

полностью заводские изготовление и комплектация теплопункта.

Анализ полученных данных свидетельствует об эффективности систем геотермального теплоснабжения.

Выводы

В процессе выполнения работы были проведены исследования геотермальной составляющей в возможном использовании для энергетического комплекса Республики Крым. В частности, проведенный расчет теплового пункта в селе Янтарное позволяет получить данные об эффективности использования геотермальной энергии для обеспечения потребителей.

По результатам исследований были предложены другие эффективные системы использования термальных вод на территории Красногвардейского, Первомайского, Джанкойского, Сакского и др. районов Крыма. Термальные воды могут использоваться не только в качестве источника тепловой энергии, но и как водные ресурсы, необходимые для потребителей Крыма.

Масштабное использования тепловых ресурсов Земли в районах тектонической деятельности, в частности на Крымском полуострове позволит значительно сэкономить традиционные энергетические ресурсы и сократить вредные выбросы в атмосферу курортного региона.

Список литературы

1. В.В. Кувшинов, Н.В. Морозова, И.Ю. Софийский Энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии: Учебное пособие/ 2018.
2. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении.– М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
3. Учебное пособие для вузов / Виссарионов В.И. Солнечная энергетика / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова– Москва, 2008 – 317с.
4. Материалы интернет сайта <http://www.avante.com.ua>
5. Материалы интернет сайта <http://www.chipdoc.ru>
6. Сафонов В.А., Смирнов С.Б., Фиделис В.В., Назаренко В.Н., Михайлов Н.П. Использование энергии моря и земли: Учебное пособие. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2004. – 232 с
7. Софийский И.Ю., Сафонов В.А., Светлых В.П., Смирнов С.Б. Источники энергии на земле: Учебное пособие/ 2002. – 248 с.
8. В.В. Кувшинов, Е.Г.Какушина, Н.В. Морозова, И.Ю. Софийский Альтернативная энергетика: Учебное пособие/ 2020. – 204с.

References

1. V.V. Kuvshinov, N.V. Morozova, I.Yu, Sofia Power plants based on renewable energy sources: Textbook/ 2018.
2. Lukutin B.V., Surzhikova O.A., Shandarova E.B. Renewable energy in decentralized power supply.– M.: Energoatomiz-dat, 2008. – 231 p.
3. Textbook for universities / Vissarionov V.I. Solar energy / V.I. Vissarionov, G.V. Deryugina, V.A. Kuznetsova – Moscow, 2008 – 317s.
4. Materials of the Internet site <http://www.avante.com.ua>
5. Materials of the Internet site <http://www.chipdoc.ru>
6. Safonov V.A., Smirnov S.B., Fidelis V.V., Nazarenko V.N., Mikhailov N.P. Using the energy of the sea and the earth: A textbook. – Se-vastopol: SNIAEiP, 2004. – 232 c
7. Sofiyskiy I.Yu., Safonov V.A., Svetly V.P., Smirnov S.B. Energy sources on earth: Textbook/ 2002. – 248 p.
8. V.V. Kuvshinov, E.G.Kakushina, N.V. Morozova, I.Y. Sofiyskiy Alternative energy: Textbook/ 2020. – 204c.

УДК 620.93

Использование генерирующих установок на основе солнечных электростанций для обеспечения потребителей Крыма

Е.М. Скрипник¹, В.В. Кувшинов², Б.Е. Борисов³, М.Р. Меджитов⁴

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия. ¹Skipnick.Ye@gmail.com, ²VVKuvshinov@sevsu.ru.

Статья поступила 27.11.2023 г.; после доработки 29.11.2023 г.

Аннотация

В работе был рассмотрен вариант снабжения потребителей электроэнергией с использованием установок на основе возобновляемых видов энергии, при расположении их в Крыму. Солнечные и ветровые энергетические технологии, экологически чистые и доступные, вполне могут заменить или дополнить традиционные способы получения энергии. Это реализуется посредством комбинированных (гибридных) энергосистем, объединяющих технологии использования возобновляемых и невозобновляемых источников энергии и предназначенных для использования преимущественно для энергоснабжения автономных потребителей.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, фотоэлектрическая панель, солнечная электростанция, энергосистема Крыма, автономный потребитель.

The use of generating plants based on solar power plants to provide consumers of Crimea

E.M. Skripnick¹, V.V. Kuvshinov², B.E. Borisov³, M.R. Medjitov⁴

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russia. ¹Skipnick.Ye@gmail.com, ²kuvshinov.vladimir@gmail.com

Received 27.11.2023 y.; received in final form 29.11.2023 y.

Abstract

The work considered the option of supplying consumers with electricity using installations based on renewable types of energy, when located in Crimea. Solar and wind energy technologies, environmentally friendly and affordable, may well replace or complement traditional methods of energy production. This is realized through combined (hybrid) energy systems that combine technologies for the use of renewable and non-renewable energy sources and are intended to be used primarily for power supply to autonomous consumers.

Keywords: renewable energy, photovoltaic panel, solar power plant, Crimean energy system, autonomous consumer.

Введение

На сегодняшний день возобновляемая энергетика весьма разнообразна и охватывает технологии, основанные на совершенно разных физических процессах при использовании солнечного света, приливов и отливов, ветра, геотер-

мальной теплоты, водных потоков, а также энергии волн.

Установки, работающие на возобновляемых источниках, оказывают гораздо меньшее воздействие на окружающую среду, чем традиционные, так как используются потоки энергии, естественно циркулирующие в окружающем про-

странстве. Экологическое воздействие энергоустановок на возобновляемых источниках в основном заключается в нарушении естественного ландшафта.

Потребность современного общества в энергии стремительно растет с каждым годом. Однако источники традиционных природных ресурсов, таких как нефть, уголь, газ и пр., также быстро истощаются; вместе с тем ограничены запасы ядерного топлива – урана и тория. Хотя термоядерное топливо – водород – практически неисчерпаемо, однако управляемые термоядерные реакции пока не освоены и неизвестно, когда они будут использоваться для промышленного получения энергии в чистом виде. Таким образом, на современном этапе помимо ресурсосбережения наиболее эффективным способом использования энергии является развитие нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Возобновляемые источники энергии, в частности солнечные электростанции (СЭС) нашли широкое применение в качестве автономных и резервных систем электроснабжения современных индивидуальных домов, коттеджей, других мелких потребителей. Такие системы позволяют обеспечить потребителя электроэнергией, как при полном отсутствии централизованной системы электроснабжения, так и при временных сбоях в работе общей энергосистемы.

Постановка задачи

Согласно стратегии, основные успехи в развитии возобновляемой энергетики (без учета гидроэнергетики) в России достигнуты в создании новых технологий по преобразованию солнечного излучения в электрическую энергию. Промышленностью выпускаются фотоэлектрические элементы на основе кремния, модули и батареи с высоким КПД преобразования, высокоэффективные (КПД более 20%) гетероструктурные солнечные элементы и энергоустановки с концентраторами солнечного излучения, микро- и малые гидростанции с оборудованием единичной мощностью от 5 кВт до 1 МВт, биогазовые установки для индивидуальных и фермерских хозяйств, обеспечивающих местные потребности в тепловой и электрической энергии, ветроэлектрические станции мощностью от сотен Ватт до десятков кВт. Однако значительное отставание имеется в производстве ветроэнергетических установок большой и средней мощности.

Основной проблемой использования ВИЭ

является их низкая экономическая конкурентоспособность по отношению к централизованной системе электроснабжения.

Перспективной областью применения ВИЭ в России являются изолированные и удаленные энергорайоны, а также резервирование системы электроснабжения особо ответственных потребителей (повышенной категории надежности). С учетом изложенного задачами развития ВИЭ являются:

1. Ввод в эксплуатацию новых генерирующих мощностей, функционирующих на основе ВИЭ, при условии их экономической эффективности.
2. Развитие отечественной научно-технической базы и освоение передовых технологий в области использования ВИЭ, наращивание производства на территории Российской Федерации основного генерирующего и вспомогательного оборудования для ВИЭ.
3. Для решения поставленных задач потребуются совершенствование механизмов стимулирования производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе ВИЭ, и поддержки использования ВИЭ в субъектах Российской Федерации, формирование инфраструктурных условий для привлечения инвестиций в развитие сектора ВИЭ, а также координация мероприятий в области развития электроэнергетики и возобновляемой энергетики.

Результаты исследований

Электроэнергетическая отрасль Крыма является сложнейшим комплексом народного хозяйства, который постоянно растет и развивается. Для дальнейшего развития региона, в связи с постоянным увеличением потребления электроэнергии, необходимо увеличение местной генерации.

Увеличение собственных произведенных мощностей позволит уменьшить потери энергии, существующие при перетоке мощностей по энергомосту, т.к. порядка 20% электроэнергии импортируется из Краснодарского края.

Исходя из вышесказанного в работе рассматривается постройка солнечной электрической станции, которая сможет покрыть недостаток электроэнергии в случае аварийной ситуации в системе.

Экономически целесообразным является такое напряжение, которому соответствуют наименьшие капитальные и эксплуатационные

(суммарные) расходы. Для повышения экономичности и надежности электроснабжения создаются электрические системы, объединяющие несколько АЭС, ГЭС, ТЭЦ, РЭС для совместной (параллельной) работы на общую сеть.

Все элементы энергетической системы объединяются общностью процессов производства,

распределения и потребления энергии, находясь под единым техническим и организационным руководством и контролем.

Обычно в такие системы входят не только электрические, но и тепловые сети и потребители тепловой энергии.

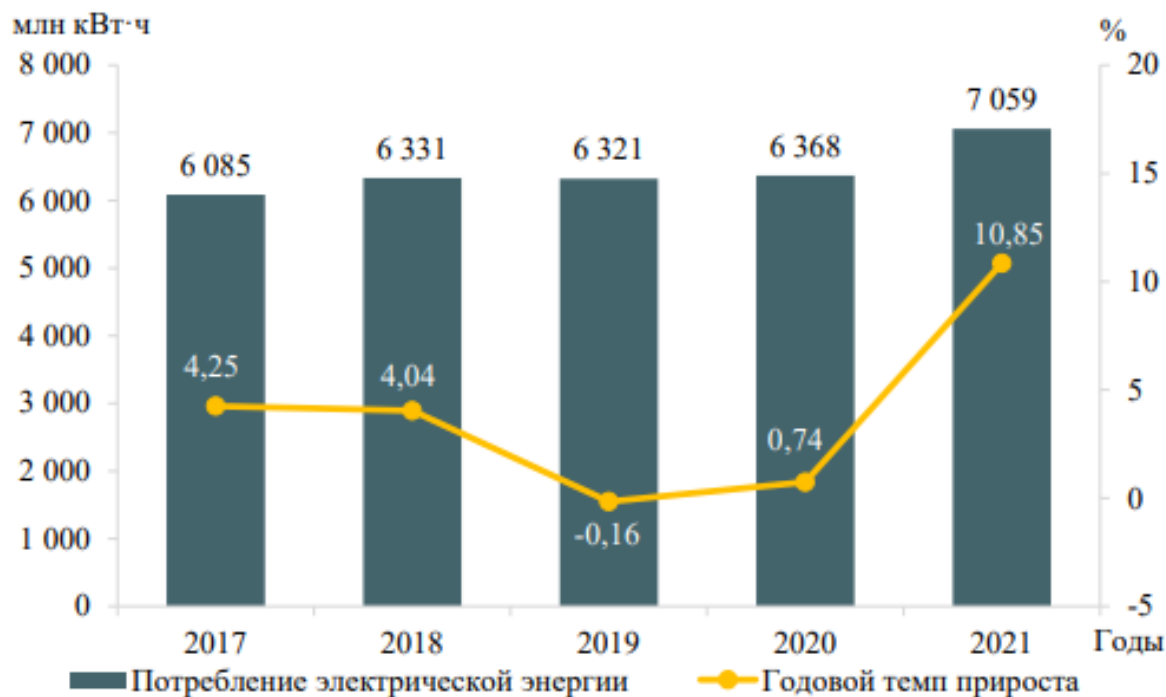


Рис. 1 Потребление электрической энергии Республики Крым и годовые темпы прироста за период 2017–2022 годов

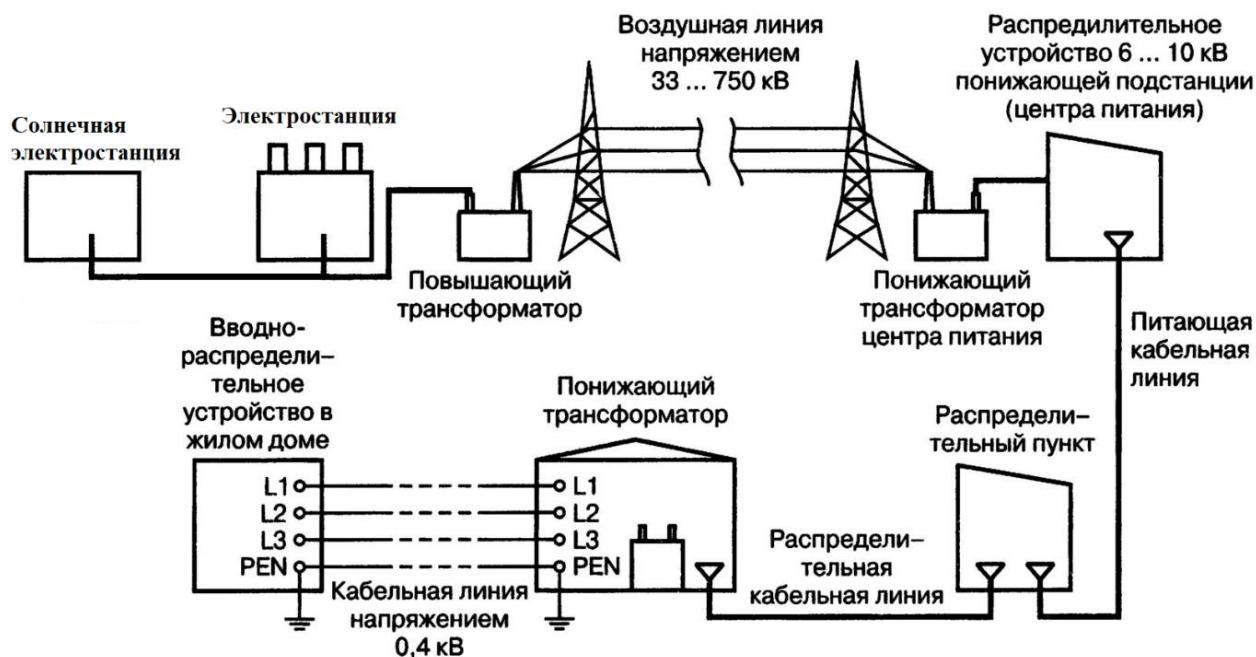


Рис. 2. Путь электрической энергии от электростанции до потребителей

Таким образом, система электроснабжения состоит из электрических станций, электрических сетей (кабельных и воздушных), понижающих и повышающих трансформаторных подстанций.

Одним из перспективнейших направлений использования солнечной энергии является применения фотоэлектрических систем (ФЭС) - систем прямого преобразования световой энергии солнечного излучения в электричество. Преимущества ФЭС прямого преобразования состоят в том, что они не имеют движущихся механических частей, не нуждаются в воде или другом теплоносителе. В зависимости от конструктивного исполнения практически не нуждаются в обслуживании. В настоящее время в результате использования новых полупроводниковых материалов, повышения их коэффициента полезного действия, удешевления стоимости и качественного улучшения характеристик стало возможным более широкое применение фотоэлектрических преобразователей и реализованных на их основе солнечных батарей.

Развитие фотоэлектрических систем электроснабжения является особенно важным для Российской Федерации благодаря благоприятным климатическим условиям - интегральная величина энергии солнечного излучения по территории России колеблется в диапазоне $1000 \div 1500$ кВт*час/м² в год при перемещении по широте.

Теперь, рассмотрим, основные компоненты системы СЭС:

1. Солнечные батареи – именно это устройство

будет генерировать электроэнергию, которую будет использовать потребитель.

2. Контроллер заряда аккумуляторных батарей – данный прибор необходим для правильного заряда аккумуляторных батарей, что влечет за собой, увеличение их срока службы.
3. Аккумуляторные батареи – для данных систем используются свинцово-кислотные аккумуляторные батареи глубокого разряда, наиболее эффективно себя зарекомендовали аккумуляторные батареи, выполненные по технологии GEL.
4. Инвертор/блок бесперебойного питания – сердце системы. Прибор, основной функцией которого является преобразование постоянного тока из аккумуляторных батарей в переменный ток напряжением 220В, также весь контроль и автоматизация системы идет через настройку блока бесперебойного питания.

Принцип работы системы: солнечные батареи или другой альтернативный источник энергии заряжают аккумуляторные батареи, уровень заряда и силу тока отслеживает контроллер заряда, вся энергия накапливается в аккумуляторах и отдается в нагрузку. При отсутствии генерации энергии от ВИЭ (возобновляемый источник энергии) нагрузка питается от аккумуляторных батарей, постоянный ток из аккумуляторных батарей преобразуется в переменный ток 220В, с помощью инвертора/блока бесперебойного питания.



Рис. 3. Схема работы автономной системы электроснабжения

При установке солнечной электрической станции (СЭС) в благоприятном районе Крыма, на площади в 2 км², что составляет 200 га. Мощность станции на таких площадях достигнет приблизительно 110 МВт. Этого будет достаточно, чтобы обеспечить электроэнергией весь Симферополь в периоды максимальных его нагрузок.

Электростанция будет состоять из 440 000 кристаллических солнечных фотоэлектрических модулей, соединённых 1 500 км кабеля. Установка может производить 132 500 МВт часов чистой электроэнергии в год. Станция позволит сократить выбросы CO₂ на 105 тысяч тонн в год, что является одним из плюсов данного вида генерации.

Выводы

По результатам исследования можно утверждать, что для обеспечения энергетической стабильности крымского региона необходимо в течение последующих лет постоянно увеличивать генерирующие мощности. Строительство крупных тепловых станций займет достаточно большое количество времени (несколько лет), то было предложено использовать фотоэлектрическую генерацию, т. к. постройку предложенной СЭС можно обеспечить за несколько месяцев.

Проведённые исследования показали, что при введении в эксплуатацию предложенной солнечной электростанции, стало бы возможно импортировать с территории Краснодарского края на 8% меньше электроэнергии. Данное решение позволит сократить потери энергии через энергопотери, в эксплуатацию внедрится новое оборудование, которое улучшит состояние энергосистемы Крыма.

Установка ВЭУ и солнечных панелей позволяет не только экономить традиционные энергоресурсы, но и способствует значительному уменьшению вредных выбросов в атмосферу и улучшает экологическую составляющую прибрежной зоны.

Список литературы

1. В.В. Кувшинов, Н.В. Морозова, И.Ю. Софийский Энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии: Учебное пособие/ 2018.
2. Городов Р.В, Губин В.Е., Матвеев А.С. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2009. – 294 с.
3. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении.– М.: Энергоатомиздат,

2008. – 231 с.

4. Крючков И. П., Старшинов В. А. Переходные процессы в электроэнергетических системах. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 415 с. [I.P.Kryuchkov, VA Elders, Transients in electric power systems. Moscow, MEI Publishing House, 2009.]
5. Учебное пособие для вузов / Виссарионов В.И. Солнечная энергетика / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова– Москва, 2008 – 317с.
6. М.В. Полканов. Значение электроэнергетики в развитии России. — Омский вестник №3(32), 2006— С38
7. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года.
8. В.Г. Королев. Современные особенности и состояние электроэнергетической отрасли РФ — «Инновации и Инвестиции» №10, 2020 — С215-219.

References

1. V.V. Kuvshinov, N.V. Morozova, I.Yu. Sofia Power plants based on renewable energy sources: Textbook/ 2018.
2. Gorodov R.V., Gubin V.E., Matveev A.S. Unconventional and renewable energy sources: Textbook. – Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University. un-ta, 2009. – 294 p.
3. Lukutin B.V., Surzhikova O.A., Shandarova E.B. Renewable energy in decentralized power supply. – M.: Energoatomizdat, 2008. – 231 p.
4. Kryuchkov I. P., Starshinov V. A. Transients in electric power systems. Moscow: Publishing House of MEI, 2009. 415 p. [I.P.Kryuchkov, VA Elders, Transients in electric power systems. Moscow, MEI Publishing House, 2009.]
5. Textbook for universities / Vissarionov V.I. Solar energy / V.I. Vissarionov, G.V. Deryugina, V.A. Kuznetsova – Moscow, 2008 – 317s.
6. M.V. Polkanov. The importance of the electric power industry in the development of Russia. — Omsk Bulletin No. 3(32), 2006— C38
7. Russia's energy strategy for the period up to 2035.
8. V.G. Korolev. Modern features and state of the electric power industry of the Russian Federation — "Innovations and Investments" No. 10, 2020 — C215-219.

УДК 533.9.07

Синтез и исследование высшего борида вольфрама на основе борофена с применением электродугового атмосферного реактора

М.Ю. Сперанский, А.А. Лавренчук, А.В. Губская, И.С. Кабанцова,
А.А. Петрушин

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия
MYSperanskiy@sevsu.ru, AALavrenchuk@sevsu.ru, gubskayanastya@mail.ru, ikabancova81@gmail.com,
apetrusina051@gmail.com

Статья поступила 10.10.2023 г.; после доработки 12.10.2023 г.

Аннотация

Совсем недавно бор присоединился к выделенной группе элементов, которые, как было подтверждено, обладают двумерными аллотропами, названными борофенами. В данной статье мы рассмотрели стабильность и твердость высших боридов вольфрама, которые состоят из борофенов, разделенных атомами металла.

Для получения данных боридов, на базе Института ядерной энергии и промышленности, СевГУ и Томского политехнического института, существуют лабораторные электротехнические установки с атмосферным электродуговым реактором на постоянном и переменном напряжении. Проводимые научные исследования помогли выявить некоторую закономерность, что на фазовый состав конечного продукта влияет количество приложенной энергии.

Ключевые слова: борид вольфрама, борофен, электродуговой реактор.

Synthesis and research of higher boron-based tungsten boride using an electric arc atmospheric reactor

M.Yu.Speranskiy, A.A.Lavrenchuk, A.V.Gubskaya, I.S. Kabantsova, A.A. Petrushin

FGAOU VO "Sevastopol State University", 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia
MYSperanskiy@sevsu.ru, AALavrenchuk@sevsu.ru, gubskayanastya@mail.ru,
ikabancova81@gmail.com, apetrusina051@gmail.com

Received 10.10.2023 y.; received in final form 12.10.2023 y.

Abstract

More recently, boron has joined a distinguished group of elements that have been confirmed to possess two-dimensional allotropes called borophenes. In this article, we examined the stability and hardness of higher tungsten borides, which consist of borophenes separated by metal atoms.

To obtain boride data, on the basis of the Institute of Nuclear Energy and Industry, SevSU and Tomsk Polytechnic Institute, there are laboratory electrical installations with an atmospheric electric arc reactor

Keywords: tungsten boride, borophene, electric arc reactor.

Введение

Высший борид вольфрама, часто называемый тетраборидом вольфрама, в последнее

время лучше всего изучается на предмет его потенциального применения в качестве сверхтвёрдого материала, однако впервые он появился в литературе в 1961 году, когда Кретьен и Хеллгор-

ский [1] предприняли первую попытку определить его структуру. Годы спустя Романс и Круг [2] сообщили, что WB_4 имеет гексагональную структуру из 20 атомов на элементарную ячейку и постоянные решетки 5,2 и 6,34 Å для a и c соответственно.

Пространственная группа этой структуры была определена как $R\bar{6}_3/mmc$. Структура $hP20-WB_4$ теперь служит эталоном структуры почти для всех последующих экспериментальных исследований, связанных с материалами, богатыми бором, со структурой, подобной WB_4 . Механические свойства WB_4 были впервые определены Гу и соавторами [3] в ходе эксперимента были установлены следующие значения твердость по Виккерсу (HV) 46,2 и 31,8 ГПа при приложенных нагрузках 0,49 и 4,90 Н соответственно, измеренные методом микроиндентирования. В последствии Мохаммади и др. [5] также измерили твердость методом микроиндентирования и сообщили о значениях HV 43,3 и 28,1 ГПа при низких (0,49Н) и высоких (4,90Н) нагрузках соответственно. Совсем недавно, была указано, что твердость по Виккерсу для $W_{0.85}B_3$ [8] должно составлять 42,0 и 25,5 ГПа при приложенных нагрузках 0,098 и 4,90Н, соответственно. В описанных экспериментах [9], учёные определили, что максимальная твердость при наноиндентировании $W_{0.82}B_{3.54}$ (при глубине проникновения 95,25 нм) составляет 41,7 ГПа.

Общепризнано, что надежная твердость материала может быть определена по области асимптотической твердости, достигаемой при высоких нагрузках [10]. Довольно большие различия между значениями H_V , указанными для WB_4 , особенно при высоких нагрузках, могут быть объяснены различиями в количестве бора, загрязнение и/или наличие вакансий вольфрама, которые были экспериментально обнаружены в исследуемых образцах [9]. Исследуя структуры с различным составом, мы можем теоретически объяснить очевидные различия между представленными экспериментальными результатами.

Постановка задачи

Общее описание $hP20-WB_4$, которое можно найти в литературе, состоит в том, что эта структура состоит из графитовых слоев бора, разделенных слоями атомов W, как в структуре $hP16-WB_3$, но с дополнительными димерами B_2 расположенными между пластинами бора и выровненными вдоль оси c (см. рис. 1). Это описание, хотя и очень элегантное, полностью отделено от более поздних исследований, связанных с двумерными

кристаллами бора [11,12]. "Обновленный" взгляд на $hP20-WB_4$ состоял бы в том, что это структура, состоящая из последовательности квазипланарных α -слоев бора (см. Рис. 2), разделенные графитовыми W-слоями. Однако обширные теоретические исследования доказали, что стехиометрическое соединение WB_4 в структуре $hP20-WB_4$ было бы термодинамически и динамически неустойчивым.

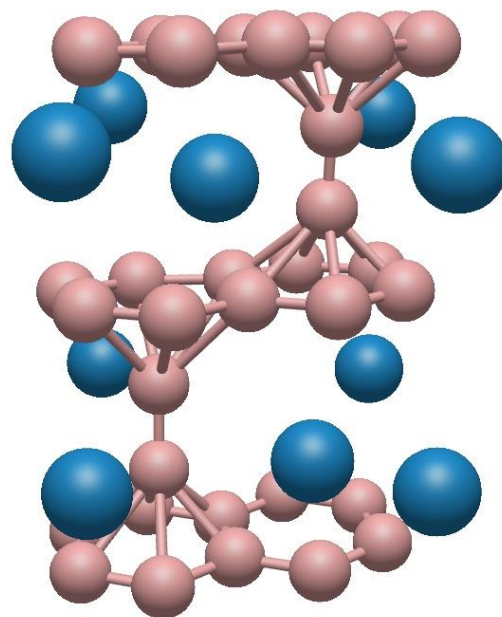


Рис. 1. Структура $hP20-WB_4$.

Большая и маленькая сферы представляют атомы вольфрама и бора соответственно.

Рассчитанная энтальпия его образования положительна и составляет 0,4 эВ/атом [13], а исходя из его фоновой дисперсии, было показано, что структура в высшей степени нестабильна [14]. Фактически, мы утверждаем, что образование стабильных квазипланарных слоев бора в структуре $hP20-WB_4$ является основной причиной нестабильности этой и связанных с ней структур, богатых бором. Таким образом, с этой точки зрения экспериментально полученные соединения WB_4 не могут принимать структуру $hP20-WB_4$.

В более поздних отчетах [13], самые высокие бориды вольфрама описаны как структуры $hP16-WB_3$ [15], загрязненные дополнительными атомами бора. Точное положение атомов бора в кристаллической решетке трудно определить экспериментально из-за большой разницы масс между атомами W и B [16].

Таким образом, сочетание теории и эксперимента имеет важное значение для понимания

наблюдаемых результатов. Поскольку в эксперименте WB_3 не только загрязнен атомами бора, но и в некоторой степени, содержит вакансии вольфрама.

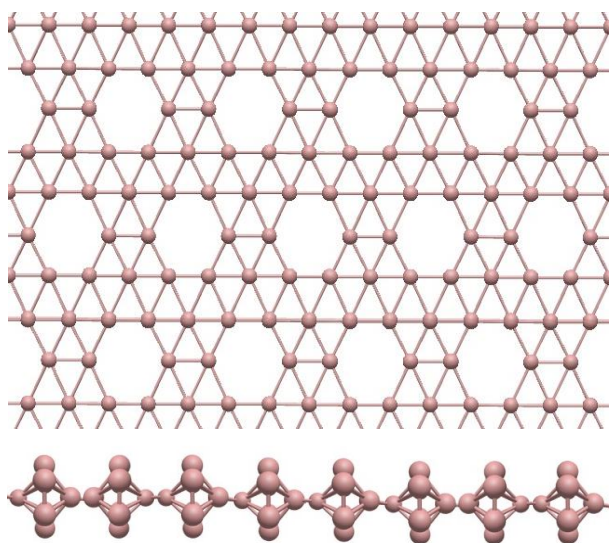


Рис. 2. Виды сбоку и сверху изогнутого α -листа из бора, присутствующего в конструкции $hP20-WB_4$.

Результаты исследований

Структура $W1-yB_3+x$. Самые высокие бориды вольфрама получают, начиная с WB_3 в структуре $hP16-WB_3$, путем добавления дополнительных атомов бора в положения, показанных красным цветом на рис. 3, и/или путем селективного удаления атомов W.

Полностью "упакованной" структурой является структура $hP20-WB_4$, показанная на рис. 1, которая имеет изогнутые α -листы бора, показанные на рис. 2, разделенные W слоями. Высота изгиба составляет $1,49\text{\AA}$ и больше, чем у отдельно стоящего треугольного листа бора ($0,82\text{\AA}$) [17]. Полное удаление всех атомов W из $hP20-WB_4$ приводит к полностью борной структуре [16], которая состоит из атомов на элементарную ячейку и показана на рис. 4.

Маленькие красные точки указывают на положение четырех дополнительных атомов бора, которые присутствуют в структуре $hP20-WB_4$.

Эта структура представляет собой не что иное, как последовательность квазиплоских α -листов бора, расположенных таким образом, что атомы бора, выступающие из графитовых каркасов, обращены друг к другу, образуя димеры. Мы можем описать структуру $hP20-WB_4$ таким же образом, за исключением того, что α -слои бора интеркалированы слоями вольфрама. Структура $hP16-B$ менее стабильна, чем α -ром-

боэдрический бор ($hR12-B$), на $0,47\text{ эВ/атом}$. Интересно, что, удалив один из бора димеры в $hP16-B$ получают несколько более стабильную (на 12 МэВ/атом) структуру $hP14-B$. Структуры $hP16-B$ и $hP14-B$ имеют пространственные группы $P6_3/mmc$ и $P6/mmc$, соответственно, и постоянные решетки $a=5,034\text{ \AA}$, $c=6,166\text{ \AA}$ и $a=5,081\text{ \AA}$, $c=5,195\text{ \AA}$ соответственно.

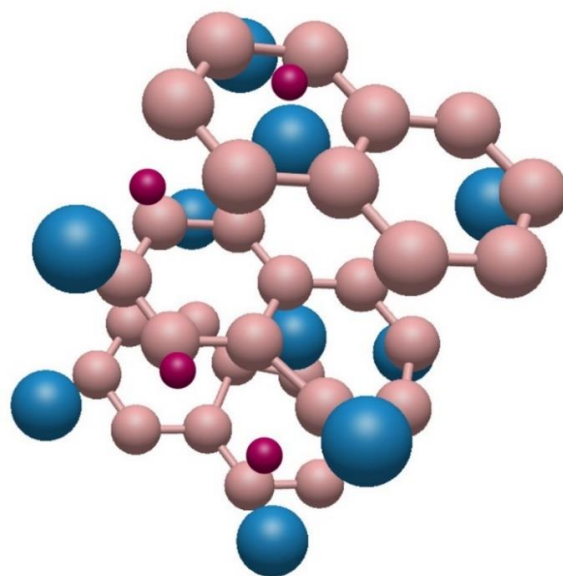


Рис. 3. Структура $hP16-WB_3$.

Стабильность соединений. Чтобы исследовать относительную стабильность генерируемых структур, мы вычисляем для каждой структуры ее энтальпию образования на атом, ΔE . Значения ΔE рассчитаны относительно энтальпий твердых частиц вольфрама и бора в объемноцентрированных кубических ($cI2-W$) и α -ромбоэдрических ($hR12-B$) структурах соответственно. Результаты для ΔE в зависимости от атомного содержания бора.

Постоянные решетки и симметрия структур обобщены в таблице 1. В эту таблицу мы также включаем для каждой структуры занятия атомов B и W относительно пространственной группы $P6_3/mmc$. Важно отметить, что если мы возьмем среднее значение всех постоянных решетки, перечисленных в таблице 1, то получим $5,192$ и $6,303\text{\AA}$ для a и c соответственно, то есть значения, которые достаточно хорошо соответствуют тем, которые были получены в эксперименте ($5,2$ и $6,34\text{ \AA}$ для a и c соответственно) [9]. Это может свидетельствовать о том, что в эксперименте наблюдается нестехиометрическая структура со случайным распределением как дополнительных

атомов бора, так и вакансий W, и может дополнительно объяснить трудности в интерпретации данных рентгеновской и нейтронной дифракции.

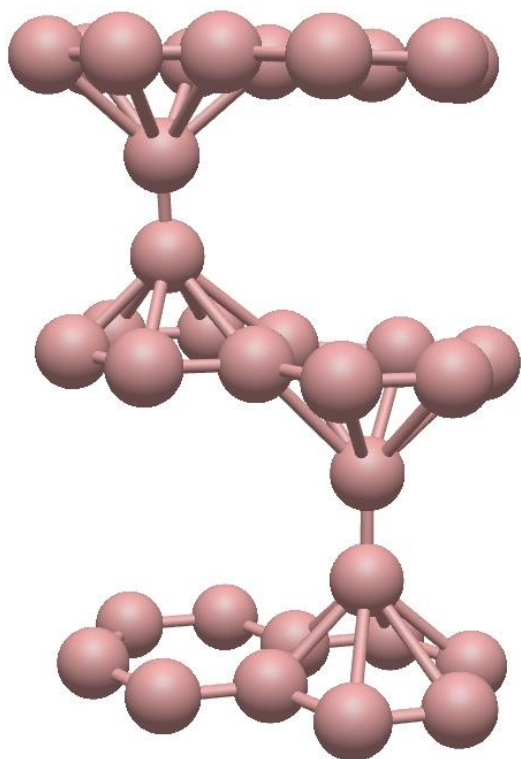


Рис. 4. Структура hP16-B, полученная путем удаления всех атомов вольфрама из hP20-WB₄.

Таблица 1. Фазы положения относительно пространственной группы $P6_3/mmc$, кристаллические решетки и результирующие пространственные группы наиболее стабильных структур при определенном содержании атомов бора.

Фаза	Положения относительно $P6_3/mmc$				a(Å)	c(Å)	Результирующая пространственная группа
	W1 (2c)	W2 (2b)	B1 (12i)	B2 (4f)			
WB ₃	1	1	1	0	5.171	6.228	$P6_3/mmc$
WB _{3.25}	1	1	1	0.25	5.173	6.405	$P3m1$
WB _{3.5}	1	1	1	0.5	5.195	6.398	$P3m1$
WB ₄	1	1	1	1	5.327	6.334	$P6_3/mmc$
W _{0.75} B ₃	0.5	1	1	0	5.179	6.064	$P6m2$
W _{0.75} B _{3.25}	0.5	1	1	0.25	5.144	6.305	$P3m1$
W _{0.75} B _{3.5}	1	0.5	1	0.5	5.139	6.398	$P6m2$
W _{0.75} B _{3.75}	0.5	1	1	0.75	5.221	6.291	$P3m1$

Механические свойства соединений. Упругие свойства исследованных структур обобщены в таблице 2. Большинство рассмотренных структур имеют твердость по Виккерсу больше или

равную 20 ГПа, что означает, что борид вольфрама с самым высоким содержанием вольфрама является твердым материалом, но не сверхтвердым (по крайней мере, в диапазоне рассматриваемого содержания бора). Особенно мягкой структурой является hP20-WB₄, который имеет модуль упругости, сравнимый с модулем упругости hP16-WB₃, но значительно меньший модуль сдвига (см. таблицу 2).

Таблица 2. Количество вакансий W

Фаза	$n_{V(W)}$	n_B	B	G	E	ν	H_v
WB ₃	0	0	31 5	26 6	62 2	0.1 7	39. 9
WB _{3.25}	0	1	28 3	18 5	45 6	0.2 3	22. 8
WB _{3.5}	0	2	31 7	15 6	40 3	0.2 9	13. 8
WB ₄	0	4	32 1	12 6	33 5	0.3 3	8.4
W _{0.75} B ₃	1	0	28 9	17 3	43 3	0.2 5	19. 5
W _{0.75} B _{3.25}	1	1	25 4	17 1	41 9	0.2 2	22. 6
W _{0.75} B _{3.5}	1	2	27 9	18 4	45 3	0.2 3	23. 1
W _{0.75} B _{3.75}	1	3	24 9	13 1	33 4	0.2 8	13. 4

где: $n_{V(W)}$ - количество дополнительных атомов В, n_B - объемный модуль, В(ГПа) - модуль сдвига, G (ГПа) - модуль Юнга, E (ГПа) - коэффициент Пуассона, ν - твердость по Виккерсу H_v (ГПа) - для нескольких $W_{1-y}B_{3+x}$ структур.

Размягчение WB₄ может быть объяснено формированием стабильных двумерных слоев бора (α -листов), которые менее плотно связаны со слоями вольфрама. Среднее расстояние между ближайшими соседями W-B составляет 2,324 и 2,383 Å в WB₃ и WB₄ соответственно, что отражает ослабление связи W-B в WB₄ по отношению к WB₃.

Другим способом объяснить недостаточную стабильность структуры hP 20-WB₄ может быть использование концепции самолегирования в листах бора, представленной в ссылке [18]. Добавляя дополнительные атомы бора в структуру hP16-WB₃, мы, по существу, переносим дополнительный отрицательный заряд в графитовые слои бора, присутствующие в hP16-WB₃. Эта дополнительная плата влияет на расстояния B-B в этих слоях. На рис. 1а, с и d мы показываем расстояния ближайших соседей B-B между атомами бора для присутствующих там структур. Расстояния B-B (1,739 Å и 1,794 Å) для атомы бора в плоскости hP20-WB₄ явно длиннее, чем соответствующие расстояния B-B (1,708 Å и

1,732Å) в hP16-WB₃. Это означает, что графитовые слои в hP20-WB₄ чрезмерно заряжены электронами. Кроме того, включение атомов вольфрама в структуру hP16-B, по-видимому, оказывает тот же эффект, что и легирование бором, поскольку расстояния B-B (1,696Å и 1,669Å) для атомов в плоскости в hP16-B короче, чем соответствующие расстояния в hP20-WB₄. Внеплоскостные атомы бора в hP20-WB₄ располагаются как можно дальше от графитовых слоев бора, чтобы свести к минимуму передачу отрицательного заряда атомам бора, расположенным в плоскости. Как следствие, мы имеем формирование димеров B₂, которые слабо связаны с графитовыми каркасами.

Заключение

Подводя итог, мы выяснили, что введение дополнительных атомов бора в структуру WB₃, в целом, энергетически невыгодно и снижает ее модуль сдвига при сохранении высокого значения объемного модуля, что фактически приводит к получению более мягкого материала. Высокая степень загрязнения бором приводит к образованию квазиплоских α-листов бора, разделенных графитовыми слоями вольфрама в WB₄.

Структуры типа W1-yB₃+x, в которых загрязнение бором сопровождается наличием вакансий вольфрама, более стабильны и тверже, чем WB₄. Наконец, формирование образований вакансий вольфрама приводит к образованию структур (например, W_{0.75}B₃+x) с твердостью по Виккерсу, которые менее чувствительны к изменениям содержания бора и близки по значению к экспериментально полученным значениям, не зависящим от нагрузки, которые превышают 20 ГПа.

В настоящее время стали широко применяться безвакуумные электродуговые методы синтеза различных материалов. Уже существуют лабораторные электротехнические установки с атмосферным электродуговым реактором на постоянном и переменном напряжении. Научные исследования данного метода синтеза определили, что на фазовый состав конечного продукта влияет количество приложенной энергии. Наши исследования по определению электрических параметров и температурных режимов установки переменного напряжения электродугового безвакуумного синтеза были изложены в [19,20]. Результаты исследования должны послужить руководством для разработки новых стратегий получения WB₄ с использованием электродугового безвакуумного синтеза материалов.

Список литературы

1. Chretien A., Helgorsky J. Borides of molybdenum and tungsten, MoB₄ and WB₄; new compounds //Compt. Rend. Acad. Sci. – 1961. – Т. 252. – С. 742-744.
2. Romans P. A., Krug M. P. Composition and crystallographic data for the highest boride of tungsten //Acta Crystallographica. – 1966. – Т. 20. – №. 2. – С. 313-315.
3. Gu Q., Krauss G., Steurer W. Transition metal borides: superhard versus ultra-incompressible //Advanced materials. – 2008. – Т. 20. – №. 19. – С. 3620-3626.
4. Liu C. et al. Low-compressibility of tungsten tetraboride: a high pressure X-ray diffraction study //High Pressure Research. – 2011. – Т. 31. – №. 2. – С. 275-282.
5. Mohammadi R. et al. Tungsten tetraboride, an inexpensive superhard material //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2011. – Т. 108. – №. 27. – С. 10958-10962.
6. Xie M. et al. Exploring the high-pressure behavior of superhard tungsten tetraboride //Physical Review B. – 2012. – Т. 85. – №. 6. – С. 064118.
7. Xiong L. et al. Radial x-ray diffraction of tungsten tetraboride to 86 GPa under nonhydrostatic compression //Journal of Applied Physics. – 2013. – Т. 113. – №. 3.
8. Tao Q. et al. Exploring hardness and the distorted sp² hybridization of B–B bonds in WB₃ //Chemistry of Materials. – 2014. – Т. 26. – №. 18. – С. 5297-5302.
9. Lech A. T. et al. Structure of superhard tungsten tetraboride: A missing link between MB₂ and MB₁₂ higher borides //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2015. – Т. 112. – №. 11. – С. 3223-3228.
10. Tian Y., Xu B., Zhao Z. Microscopic theory of hardness and design of novel superhard crystals //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2012. – Т. 33. – С. 93-106.
11. Tang H., Ismail-Beigi S. Novel precursors for boron nanotubes: the competition of two-center and three-center bonding in boron sheets //Physical review letters. – 2007. – Т. 99. – №. 11. – С. 115501.
12. Feng B. et al. Experimental realization of two-dimensional boron sheets //Nature chemistry. – 2016. – Т. 8. – №. 6. – С. 563-568.
13. Cheng X. Y. et al. Computational materials discovery: the case of the W–B system //Acta Crystallographica Section C: Structural Chemistry. – 2014. – Т. 70. – №. 2. – С. 85-103.
14. Zhang R. F. et al. Stability and strength of transition-metal tetraborides and triborides //Physical Review Letters. – 2012. – Т. 108. – №. 25. – С. 255502.
15. Cheng X. et al. Interstitial-boron solution strengthened WB₃+ x //Applied Physics Letters. – 2013. – Т. 103. – №. 17.
16. Zeiringer I. et al. Crystal structure of W 1– x B 3 and phase equilibria in the boron-rich part of the systems

Mo-Rh-B and W-{Ru, Os, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt}-B //Journal of phase equilibria and diffusion. – 2014. – Т. 35. – С. 384-395.

17. Kunstmann J., Quandt A. Broad boron sheets and boron nanotubes: An ab initio study of structural, electronic, and mechanical properties //Physical Review B. – 2006. – Т. 74. – №. 3. – С. 035413.
18. Tang H., Ismail-Beigi S. Self-doping in boron sheets from first principles: A route to structural design of metal boride nanostructures //Physical Review B. – 2009. – Т. 80. – №. 13. – С. 134113.
19. Губин В.Е., Лавренчук А.А., Сперанский М.Ю., Пак А.А. Исследование электрических параметров прототипа технологической установки электродугового синтеза переменного тока в открытой воздушной среде, Энергетические установки и технологии. 2022. т. 8. № 4. с. 27-31.
20. Лавренчук А.А., Сперанский М.Ю., Поваляев П.В., Исследование температурных режимов работы электродугового плазменного реактора переменного тока для синтеза материалов, Сборник статей II Всероссийской с международным участием молодёжной конференции. Томск, 2022. С. 475-479.

References

1. Chretien A., Helgorsky J. Borides of molybdenum and tungsten, MoB₄ and WB₄; new compounds //Compt. Rend. Acad. Sci. – 1961. – Т. 252. – С. 742-744.
2. Romans P. A., Krug M. P. Composition and crystallographic data for the highest boride of tungsten //Acta Crystallographica. – 1966. – Т. 20. – №. 2. – С. 313-315.
3. Gu Q., Krauss G., Steurer W. Transition metal borides: superhard versus ultra-incompressible //Advanced materials. – 2008. – Т. 20. – №. 19. – С. 3620-3626.
4. Liu C. et al. Low-compressibility of tungsten tetraboride: a high pressure X-ray diffraction study //High Pressure Research. – 2011. – Т. 31. – №. 2. – С. 275-282.
5. Mohammadi R. et al. Tungsten tetraboride, an inexpensive superhard material //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2011. – Т. 108. – №. 27. – С. 10958-10962.
6. Xie M. et al. Exploring the high-pressure behavior of superhard tungsten tetraboride //Physical Review B. – 2012. – Т. 85. – №. 6. – С. 064118.
7. Xiong L. et al. Radial x-ray diffraction of tungsten tetraboride to 86 GPa under nonhydro-static compression //Journal of Applied Physics. – 2013. – Т. 113. – №. 3.
8. Tao Q. et al. Exploring hardness and the distorted sp² hybridization of B-B bonds in WB₃ //Chemistry of Materials. – 2014. – Т. 26. – №. 18. – С. 5297-5302.
9. Lech A. T. et al. Structure of superhard tungsten tetraboride: A missing link between MB₂ and MB₁₂

higher borides //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2015. – Т. 112. – №. 11. – С. 3223-3228.

10. Tian Y., Xu B., Zhao Z. Microscopic theory of hardness and design of novel superhard crystals //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2012. – Т. 33. – С. 93-106.
11. Tang H., Ismail-Beigi S. Novel precursors for boron nanotubes: the competition of two-center and three-center bonding in boron sheets //Physical review letters. – 2007. – Т. 99. – №. 11. – С. 115501.
12. Feng B. et al. Experimental realization of two-dimensional boron sheets //Nature chemistry. – 2016. – Т. 8. – №. 6. – С. 563-568.
13. Cheng X. Y. et al. Computational materials discovery: the case of the W-B system //Acta Crystallographica Section C: Structural Chemistry. – 2014. – Т. 70. – №. 2. – С. 85-103.
14. Zhang R. F. et al. Stability and strength of transition-metal tetraborides and triborides //Physical Review Letters. – 2012. – Т. 108. – №. 25. – С. 255502.
15. Cheng X. et al. Interstitial-boron solution strengthened WB₃+x //Applied Physics Letters. – 2013. – Т. 103. – №. 17.
16. Zeiringer I. et al. Crystal structure of W_{1-x}B₃ and phase equilibria in the boron-rich part of the systems Mo-Rh-B and W-{Ru, Os, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt}-B //Journal of phase equilibria and diffusion. – 2014. – Т. 35. – С. 384-395.
17. Kunstmann J., Quandt A. Broad boron sheets and boron nanotubes: An ab initio study of structural, electronic, and mechanical properties //Physical Review B. – 2006. – Т. 74. – №. 3. – С. 035413.
18. Tang H., Ismail-Beigi S. Self-doping in boron sheets from first principles: A route to structural design of metal boride nanostructures //Physical Review B. – 2009. – Т. 80. – №. 13. – С. 134113.
19. Губин В.Е., Лавренчук А.А., Сперанский М.Ю., Пак А.А. Study of electrical parameters of a prototype of a technological installation for electric arc synthesis of alternating current in an open air environment, Power plants and technologies. 2022. vol. 8. No. 4. pp. 27-31.
20. Lavrenchuk A.A., Speransky M.Yu., Polyayev P.V., Investigation of temperature modes of operation of an electric arc plasma reactor of alternating current for the synthesis of materials, Collection of articles of the II All-Russian Youth Conference with international participation. Tomsk, 2022. pp. 475-479.

УДК 621.311.24

Автономные ветроэлектрические установки для электроснабжения индивидуальных потребителей в Крымском регионе

А.С. Цветков¹, В.В. Кувшинов², А.С. Владимиров³, И.Д. Артеменко⁴,
А.Д. Касницкий⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия. ¹tsvet_2001@mail.ru, ²VVKuvshinov@sevsu.ru, ³Fontan129a@mail.ru, ⁴leftysingle@gmail.com, ⁵makkas_snab@mail.ru

Статья поступила 29.11.2023 г.; после доработки 30.11.2023 г.

Аннотация

Рассматриваются варианты электроснабжения индивидуального потребителя с помощью автономных ветроэлектрических установок с вертикальным и горизонтальным ротором с возможностью подключения к централизованной сети для Крымского региона, а также зависимость выработки электроэнергии ВЭУ от скорости ветра.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, возобновляемая энергетика, автономный потребитель

Autonomous wind electric installations for power supply of individual consumers in the Crimea region

A.S. Tsvetkov¹, V.V. Kuvshinov², A.S. Vladimirov³, I.D. Artemenko⁴,
A.D. Kasnitsky⁵

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russia. ¹tsvet_2001@mail.ru, ²VVKuvshinov@sevsu.ru, ³Fontan129a@mail.ru, ⁴leftysingle@gmail.com, ⁵makkas_snab@mail.ru

Received 29.11.2023 y.; received in final form 30.11.2023 y.

Abstract

Options for power supply to an individual consumer using autonomous wind power plants with a vertical and horizontal rotor with the ability to connect to a centralized network for the Crimean region are considered, as well as the dependence of wind turbine power generation on wind speed.

Keywords: wind power plant, renewable energy, autonomous consumer

Введение

Ветер фактически является производной формой солнечной энергии: движение воздушных потоков — это следствие неравномерного нагревания Солнцем поверхности Земли. Воздушные потоки различной силы присутствуют

почти в любом месте земного шара. Однако целесообразность утилизации энергии ветра, применение конкретной технологии и ветроэнергетического оборудования в каждом конкретном случае имеют существенные различия [1].

Если загородный коттедж подключен к электрической магистрали и впоследствии не

возникает частых перебоев с поставками электроэнергии, то у хозяев вряд ли возникнет желание переходить на альтернативные источники. Однако так бывает не всегда. Существует огромное количество отдаленных районов, где можно было бы построить дом. Однако застройщиков останавливает отсутствие электричества. Из-за плохой осведомленности о возможностях ветроэнергетических установок, такие участки остаются неосвоенными. А ведь решить проблему с электричеством при помощи доступных возобновляемых источников не так уж и сложно [3].

Постановка задачи

Если речь идёт об электроснабжении индивидуального потребителя, находящегося на участке, отдалённом от централизованного электроснабжения, то возможен вариант снабжения электричеством от автономных установок.

При подключении к централизованной сети, необходимо учитывать следующие моменты: оплата стоимости подключения к сети, стоимость прокладки низковольтной ЛЭП, а также, оплата потребляемой электроэнергии по расценкам энергосетей.

Другой вариант - создание собственной автономной системы электроснабжения. Плюсы этого варианта - не нужно платить за подключение к сетям централизованного электроснабжения и строительство ЛЭП, независимость от цен на электроэнергию. Минусы - придётся уделять время на техническое обслуживание и ремонт оборудования [4].

Так же данный вариант может являться единственным из-за отсутствия возможности подключения к сетям централизованного электроснабжения.

Ветроэлектрические установки

Мировой опыт использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) показал, что конструктивно ветроэнергетическая установка должна состоять из ветродвигателя (ВД), машинного отделения, опоры.

Ветродвигатель непосредственно преобразует энергию ветрового потока в механическую, которая в дальнейшем используется для привода машин (например, насосов) или трансформируется в электрическую энергию [2].

Ветродвигатели, используемые в качестве привода электрического генератора ВЭУ, делятся на два основных типа:

- горизонтально-осевые (ГО), характеризующиеся коллинеарностью вектора угловой

скорости вращения ветродвигателя и аксиальной составляющей вектора скорости ветрового потока (рис. 1).

- вертикально-осевые (ВО), характеризующиеся ортогональностью вектора угловой скорости вращения ветродвигателя и аксиальной составляющей вектора скорости ветрового потока (рис. 2).



Рис. 1. Общий вид ВЭУ с горизонтально-осевым ротором



Рис. 2. Общий вид ВЭУ с вертикально-осевым ротором

Всю энергию ветрового потока, протекающего через ветровое колесо, преобразовать в механическую невозможно. Часть ее теряется на сопротивление ветротурбины движению частиц воздуха, часть на трение; значительная ее часть

уходит с потоком далее, минуя ветрогенератор.

С учетом всего мощность ветрогенератора на валу ветротурбины можно рассчитать, используя формулу:

$$P_{ВЭУ} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_0 \cdot C_p \cdot V^3 \cdot \eta$$

где: ρ – плотность;

V – скорость;

S_0 – площадь ометаемой поверхности;

C_p – коэффициент определяющий количество энергии, отнятое у ветра посредством ротора;

η – механический КПД.

Принцип действия ветрогенератора с горизонтальной осью вращения достаточно прост. В данном случае поток ветра вращает ветроколесо с лопастями, ось которого приводит в движение вал электрогенератора. В установки мощностью до 100 кВт генератор напрямую соединен с осью ветроколеса, а у более мощных агрегатов посредством повышающего редуктора. Крыльчатые ветрогенераторы обладают наивысшим КПД, а потому этот тип установок занимает до 90% рынка [9].

Крупные ветрогенераторы с горизонтальным расположением оси имеют сложную систему ограничения оборотов вращения. При сильном ветре специальные механизмы разворачивают установку под определенным углом атаки ветра, снижая тем самым обороты ветроколеса без помощи фрикционных и иных тормозных устройств [5-7].

Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения встречаются нечасто, но иногда они незаменимы. Прежде всего, это карусельные и роторные ВЭУ. Особенностью установок данного типа является работа при любом направлении ветра. ВЭУ с горизонтальной осью вращения вынуждены поворачиваться за ветром, как флюгеры. Вертикальная ось позволяет улавливать ветер с разных направлений. Одновременно недостатком и преимуществом ВЭУ карусельного или роторного типа стала ограниченная скорость вращения. Недостаток – низкий КПД, а преимущество – отсутствие шума во время работы. Тихоходность таких установок позволяет применять несложные схемы и снизить устойчивость к резким порывам ветра [8].

Результаты исследования

Основные преимущества горизонтально осевых ВЭУ по сравнению с вертикально-осевыми ВЭУ:

- возможность обеспечения самостоятельного пуска без вспомогательного привода;
- уменьшение массогабаритных показателей электромеханического оборудования при повышении частоты вращения;
- уменьшение в 2-3 раза площади лопастей при данной ометаемой поверхности;
- увеличение коэффициента использования энергии ветра;
- значительное уменьшение площади, занимаемой под башню.

В силу этих преимуществ для поставленной цели будет использоваться горизонтально-осевая ВЭУ.

Правила подключения к электросети частных домов изложены в СП 31-110-2003 «Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий» и РМ-2696-01 «Временная инструкция по расчету электрических нагрузок жилых зданий». Согласно этим документам, на каждый частный дом должно выделяться от 5 до 7 кВт, если установлена газовая плита, и от 8 до 11 кВт с установленной электроплитой.

Оборудование для ВЭУ

Ветрогенераторы не могут поставлять электричество в домашнюю сеть непосредственно, поскольку скорость ветра непостоянна. Ни одно электрооборудование не будет работать при столь больших скачках напряжения, а в период безветрия, потребители вообще могут остаться без электричества. Ветрогенераторы вырабатывают так называемое «грязное» электричество, которое еще нужно привести к сетевым параметрам 220 В/50 Гц. А это возможно только посредством аккумуляторного блока, в котором будет накапливаться и храниться электричество. В целом схема автономного электроснабжения с ВЭУ выглядит следующим образом: ветрогенератор – контроллер заряда – блок аккумуляторных батарей АКБ – инвертор.

Емкость блока аккумуляторов будет зависеть прежде всего от мощности ветрогенератора. Для моделей мощностью 1 кВт потребуются блок, состоящий из четырех АКБ на 190 А•ч каждая.

Контроллер, объединенный с зарядным устройством для АКБ, и инвертер находятся рядом с аккумуляторным блоком. Для вспомогательного оборудования лучше всего выделить отдельное небольшое, но хорошо проветриваемое и отапливаемое помещение, где влажность воздуха не будет превышать 70%. При этом мачта ветряка должна располагаться как можно

ближе к этому помещению, обеспечивающему бесперебойное электроснабжение.

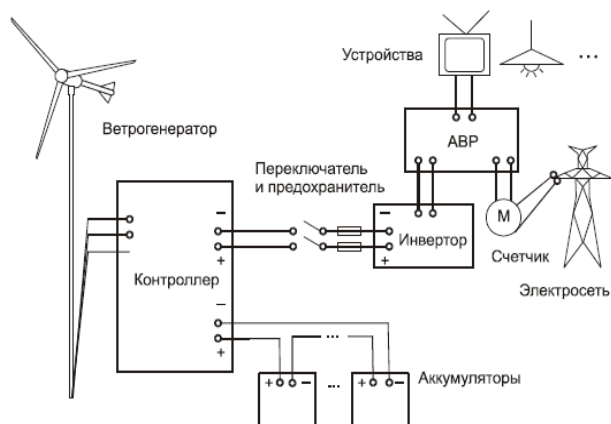


Рис. 3. Общая схема автономного электроснабжения с ВЭУ с подключением к централизованной сети

Выбор места для ВЭУ

Сила ветра увеличивается с высотой, т.е. чем выше мачта, тем эффективнее работа ветроустановки. Вокруг рабочего колеса ветрогенератора не должно быть никаких препятствий, в т.ч. других ветряков. Поэтому мачта ВЭУ должна быть выше всех зданий, деревьев и прочих препятствий. Считается, что оптимально ветряк должен располагаться на 3-4 м выше препятствий, находящихся в радиусе 200 м.

Мачта небольшой ветротурбины, как правило, представляет собой длинную трубу, установленную на бетонном фундаменте и удерживаемая в вертикальном положении растяжками. Концы растяжек зацепляются за арматуру бетонных столбиков, заглубленных на 2 м в грунт. Диаметр столбиков составляет 50 см.

В связи с постоянными проблемами с обеспечением индивидуальных частных домов, особенно в не городской местности, возникает потребность обеспечения автономных потребителей дополнительными генерирующими мощностями. В свете экологических проблем обеспечения курортного региона, которым является, крымский полуостров возникает острая потребность в сокращении вредных выбросов энергетических установок. Установками, удовлетворяющими поставленным выше условиям, и являются ветроэлектрические системы, которые можно использовать для электрообеспечения индивидуальных потребителей [2, 3, 10].

Хотя и горизонтально-осевые ветроустановки занимают 90% рынка, не стоит исключать возможность установки вертикально-осевых

ВЭУ для индивидуального потребителя.

На сегодняшний день вертикальные ветрогенераторы являются одной из самых эффективных разработок. Основными преимуществами вертикальных ветрогенераторов является простота монтажа, доступность во время эксплуатации и круглогодичная работа без снижения производительности в осенне-зимний период, а также меньшее количество шума по сравнению с горизонтальными ветроустановками.

Оснащение ветровыми установками с вертикальным расположением ротора позволяет значительно увеличить эффективность преобразования ветрового потока и обеспечить необходимые характеристики генерируемой электроэнергии.

Выводы

В результате проведенных исследований были предложены различные варианты обеспечения дополнительными электрическими мощностями автономных потребителей крымского региона. По результатам проведенных исследований было предложено использовать для энергоснабжения индивидуального потребителя ветровые электрические установки с вертикальным расположением ротора, что позволяет значительно увеличить эффективность их работы и уменьшить негативное влияние непостоянства направлений ветрового потока.

Использование ветротурбин вертикально-осевого типа позволяет значительно уменьшить их габаритные размеры и высоту башни, что особенно необходимо в условиях ограниченных площадей для установки на частных жилых хозяйствах.

Использование ветроэлектрических установок для генерации электроэнергии позволяет уменьшить вредные выбросы в курортном крымском регионе и позволяет улучшить экологическую составляющую.

Список литературы

1. Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Софийский Н.В. Энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии: Учебное пособие. 2018. – 277с.
2. Абдали Л. М. Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения / Л. М. Абдали, Х. А. Исса, М. Н. Аль-Малики, В.В. Кувшинов, Э.А. Бекиров // Строительство и технологическая безопасность. – 2022. – № 25(77). – С.

- 75-85.
3. Абдали Л. М. Интеллектуальная система управления, используемая при работе ветроэлектрических установок /Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С.102–112.
4. Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Софийский И.Ю., Морозова Н.В. Альтернативная энергетика: Учебник по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, 14.06.01 Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии, 13.06.01 Электро- и телотехника для студентов очного и заочного отделения: учебник. Севастополь: СевГУ, 2020. – 181 с.
5. В. Н. Андрианов, Д. Н. Быстрицкий, К. П. Вакевич, В. Р. Секторов. глава 2. Ветро двигатели, глава 3. Ветроустановки постоянного тока // Ветроэлектрические станции / под редакцией В. Н. Андрианова. — М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960. — 320 с.
6. Е. М. Фатеев. Ветро двигатели и ветроустановки. — М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1948. — 544 с.
7. Кирпичникова, И.М. Ветроэнергетические установки. Расчет параметров компонентов: учебное пособие / И.М. Кирпичникова, Е.В.Соломин. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. — 83 с.
8. С.Н. Удалов Возобновляемые источники энергии. «Учебники НГТУ», Новосибирск, 2007
9. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Книга 2, Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. — Учебник. - Харьков: Нац. Аэрокосмический Университет, «Харьковский Авиационный Институт», Севастополь: Севаст. Нац. Тех. Ун-т, 2004. — 519 с.
10. Мхитарян Н. М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы / Н. М. Мхитарян. — К.: «Научная мысль», 1999, 320 с
- field 03/13/02 Electrical power and electrical engineering, 04/13/02 Electrical power and electrical engineering, 06/14/01 Nuclear, thermal and renewable energy and re-lated technologies, 06/13/01 Electrical and thermal engineering for full-time and part-time students: textbook. Sevastopol: SevGU, 2020. – 181 p.
5. V. N. Andrianov, D. N. Bystritsky, K. P. Vaskevich, V. R. Sektorov. chapter 2. Wind turbines, chapter 3. DC wind turbines // Wind power plants / edited by V. N. Andrianov. - M., Leningrad: State Energy Publishing House, 1960. - 320 p.
6. E. M. Fateev. Wind engines and wind turbines. - M.: State Publishing House of Agricultural Literature, 1948. - 544 p.
7. Kirpichnikova, I.M. Wind power installations. Calculation of component parameters: textbook / I.M. Kirpichnikova, E.V. Solomin. — Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2013. — 83 p.
8. S.N. Udalov Renewable energy sources. “Textbooks of NSTU”, Novosibirsk, 2007
9. Krivtsov V. S. Inexhaustible energy. Book 2, Wind Energy / V.S. Krivtsov, A. M. Oleinikov, A. I. Yakovlev. - Textbook. - Kharkov: Nat. Aerospace University, “Kharkov Aviation Institute”, Sevastopol: Sevast. National Those. Univ., 2004. — 519 p.
10. Mkhitaryan N. M. Energy of nontraditional and renewable sources. Experience and prospects / N. M. Mkhitaryan. — K.: “Scientific Thought”, 1999, 320 p.

References

1. Kuvshinov V.V., Morozova N.V., Sofiysky N.V. Energy installations based on renewable energy sources: Textbook. 2018. – 277 p.
2. Abdali L.M. Design and study of operating modes of combined solar-wind installations to provide street lighting / L.M. Abdali, H.A. Issa, M.N. Al-Maliki, V.V. Kuvshinov, E.A. Bekirov // Construction and industrial safety, 2022. – № 25(77). – pp. 75-85.
3. Abdali L.M., Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Smart Control System for the Wind Energy Networks // Vestnik IzGTU imeni M.T. Kalasnikova. - 2021. - Vol. 24. - N. 1 - P. 102-112.
4. Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Sofiysky I.Yu., Morozova N.V. Alternative energy: Textbook in the

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 535.417

Определение расстояния между двумя щелями интерференционным методом

В.В. Довгаленко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, fizik71@yandex.ru

Статья поступила 22.11.2023 г. после доработки 24.11.2023 г.

Аннотация

В статье представлено описание лабораторной работы «Определение расстояния между двумя щелями интерференционным методом», разработанной с использованием установки ФПВ 05-3-2 для студентов направления подготовки 14.05.02 «Проектирование и эксплуатация атомных станций» и «Система контроля и управления атомных станций», 14.03.01 - «Ядерная энергетика и теплофизика», 16.03.03 - «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения» с целью повышения качества усвоения теоретического материала по теме «Колебания и волны».

Ключевые слова: физика, лабораторная работа, свет, интерференция, длина волны.

Determination of the distance between two slits by the interference method

V.V. Dovgalenko

Sevastopol state University, 33 Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russia, fizik71@yandex.ru

Received 22.11.2023 y.; received in final form 24.11.2023 y.

Annotation

The article presents a description of the laboratory work "Determination of the distance between two slits by the interference method", developed using the FPV 05-3-2 installation for students of the training direction 14.05.02 "Design and operation of nuclear power plants" and "Control and management system of nuclear power plants", 14.03.01 - "Nuclear power and thermophysics", 16.03.03 - "Refrigeration, cryogenic equipment and life support systems" in order to improve the quality of assimilation of theoretical material on the topic "Vibrations and waves".

Keywords: physics, laboratory work, light, interference, wavelength.

Введение

К середине XVII века о световых лучах уже было известно, что они прямолинейны и при пересечении не влияют друг на друга, подчиняются законам отражения и преломления. Оставалась главная загадка: что же такое свет, как он распространяется и почему в некоторых случаях окрашивается в разные цвета? Для ответов на эти вопросы ушло несколько веков.

Из ранних исследований в области физики известно, что свет представляет собой сложное

явление. Исаак Ньютон придерживался корпускулярной теории, согласно которой свет — это поток частиц (лат. *Corpusculum* - частица), идущих от источника во все стороны. Гюйгенс же утверждал, что свет — это волны, распространяющиеся в особой среде - эфире, заполняющим все пространство и проникающим внутрь всех тел. Обе теории длительное время существовали параллельно. Только благодаря своему авторитету в научных кругах Ньютон убедил большинство ученых отдать предпочтение корпускулярной теории.

Но на основе корпускулярной теории трудно было объяснить, почему световые пучки, пересекаясь в пространстве, никак не воздействуют друг на друга. Ведь световые частицы должны сталкиваться и рассеиваться. И такое неопределенное положение относительно природы света длилось до начала XIX века, когда были открыты явления дифракции (огибание светом непрозрачных препятствий) и интерференции (усиление или ослабление освещенности при наложении двух и более световых волн друг на друга) света. Ведь эти явления присущи только волновому движению, и не поддаются объяснению корпускулярной теорией.

Во второй половине XIX века (1865 г.) Максвелл доказал, что свет есть частный случай электромагнитных волн, которые распространяются в пространстве со скоростью света. В 1900 году Макс Планк выдвинул идею, что свет излучается порциями - квантами. Эйнштейн принял гипотезу Планка и стал развивать ее в различных направлениях.

В частности, он доказал, что свет не только излучается и поглощается отдельными порциями в виде квантов, но и состоит из дискретных порций - фотонов. Но в начале XX века представления о свете опять начали меняться. Этому способствовали открытия новых явлений, таких как: фотоэффект, эффект Комптона, тепловое излучение. На основе их напрашивался вывод, что свет — это сразу и частица, и волна: в одних условиях проявляются его корпускулярные свойства, в других — волновые.

Для глубокого понимания природы света студентами, необходимо проводить лабораторные исследования, позволяющие на практике подтвердить корпускулярно-волновой дуализм света. К примеру, волновые свойства света можно наблюдать, проводя эксперименты на установке ФПВ 05-3-2, одно из назначений которой, состоит в том, что она позволяет определять расстояния между двумя щелями интерференционным методом.

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Разработать лабораторную работу «Определение расстояния между двумя щелями интерференционным методом», выполняемую, на установке ФПВ 05-3-2.
2. Провести данную лабораторную работу среди студентов технических специальностей очной формы обучения направления

14.05.02 «Проектирование и эксплуатация атомных станций» и «Система контроля и управления атомных станций», 14.03.01 - «Ядерная энергетика и теплофизика», 16.03.03 - «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения».

Основная часть

Для лабораторных работ используются различного рода установки. Это оборудование помогает в наглядной демонстрации физических явлений. Лабораторные установки можно разделить на следующие типы:

1. Общее оборудование — это лабораторные приборы или устройства, применяемые при предварительных работах с образцом.
2. Специальное оборудование — это любые лабораторные устройства, характеризующиеся повышенной точностью результатов исследований.
3. Измерительные приборы — это лабораторное оборудование и принадлежности, предназначенные для определения качественных и количественных характеристик исследуемого образца.
4. Аналитическое оборудование: предназначено для выявления состава вещества с высокой точностью.
5. Испытательное оборудование — это приборы или устройства, предназначенные для исследования проб, их химических и физических изменений под воздействием внешних факторов.

Используемую установку ФПВ 05-3-2 можно отнести сразу к двум типам лабораторного оборудования: измерительным и испытательным лабораторным приборам.

В начале лабораторной работы студенту предлагается ознакомиться с установкой (рис.1).

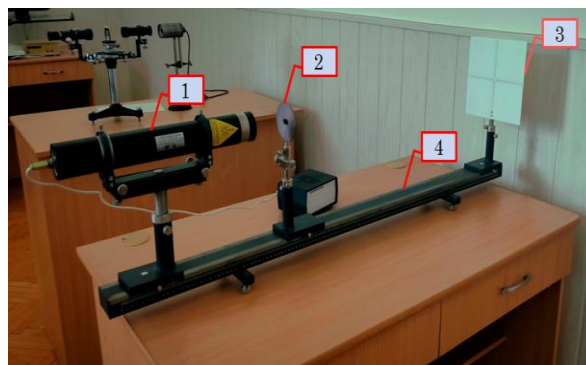


Рис. 1. Установка «ФПВ 05-3-2»: 1 – лазер; 2 – объект с щелями; 3 – экран; 4 – приборная доска.

Порядок выполнения лабораторной работы обучающиеся могут найти в методическом пособии составленном специально под данную работу.

За основу лабораторной работы был взят опыт Томаса Юнга (1801 г).

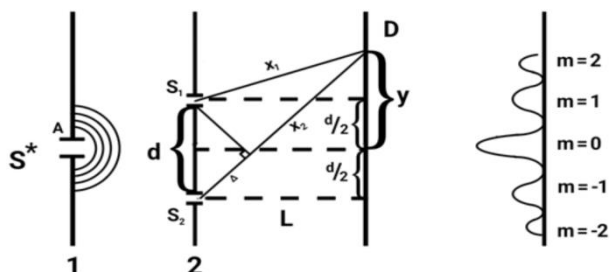


Рис. 2. Схема опыта Юнга.

На рисунке приведены используемые физические величины, для того чтобы студент мог наглядно понять порядок вывода конечной формулы

Также, в работе представлена выведенная в ходе эксперимента формула для вычисления расстояния между двумя щелями:

$$d = \frac{L}{\Delta y} \lambda$$

где d – расстояние между щелями; L – расстояние от объекта (двух щелей) до экрана; Δy – период интерференционной решетки (расстояние между соседними минимумами интенсивности); λ – длина волны (красного цвета), равная 632,82 нм;

После ознакомления с порядком выполнения лабораторной работы, студент может приступить к её выполнению, включив питание лазера.

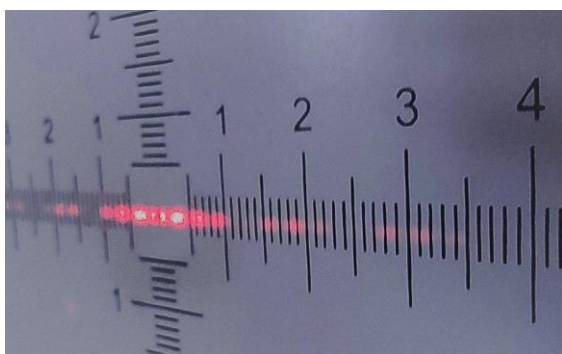


Рис. 3. Интерференционная решетка.

В лабораторной работе обучающемуся предстоит рассчитать период интерференционной решетки, по следующей формуле

$$\Delta y = \frac{\Delta r}{N}$$

где Δr – расстояние от крайнего минимума до центра; N – общее число минимумов, деленное на 2.

Затем, с помощью полученных данных и предоставленных значений из таблицы, предложенной в описании к лабораторной работе, студент вычисляет расстояние между двумя щелями. Выполнив по указанию преподавателя необходимое количество опытов для разного расстояния от объекта до экрана, обучающийся вычисляет усредненные значения расстояния между щелями. Оценить правильность своих расчетов можно, сравнив полученный результат с паспортными данными.

Заключение

Представленная лабораторная работа «Определение расстояния между двумя щелями интерференционным методом» была составлена на основе проведенного эксперимента. На практике была подтверждена правильность выведенной Юнгом формулы.

Чтобы оценить эффективность лабораторной работы она была проведена среди пяти классов студентов технических специальностей, на основе чего получен статистический результат: 92% с легкостью выполнили лабораторную работу, 8% - не смогли самостоятельно выполнить эксперимент. После, оказалось, что все студенты, не справившиеся с лабораторной работой, отсутствовали на лекции по этой теме. Это говорит о том, что для лучшего усвоения материала, необходимо участие преподавателя.

В результате проделанной работы стало понятно, что составленная лабораторная работа отлично подходит для ознакомления студентов с волновой природой света. Студенты лучше понимают изучаемый материал, собственноручно проведя эксперимент на установке ФПВ 05-3-2.

Список литературы

1. Алехнович В.И. Лабораторный практикум по физической оптике: учебное пособие / Алехнович В.И., Качурин Ю.Ю., Пиотровская И.Н. [и др.]. — Москва: МГТУ им. Баумана, 2016. — 173 с.
2. Борн М., Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. М.: Наука, 1973. 720 с.
3. Мишик С. А. Целостно - системный физический образ Мира / Мишик С. А. // Сборник статей Международной научно - практической конфе-

- ренции «Концепции, теория и методика фундаментальных и прикладных научных исследований» (Екатеринбург, 13.02.2020 г.). – Стерлитамак: АМИ, 2020. – С. 11 - 13.
4. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – Изд. 9-е, перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 560 с.
 5. Юнг Т. Об интерференции света и ее проявлениях / Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки. – М.: Высшая школа, 1989. – 576 с.
 6. Бурмистров В.В., Погребняк Г.Е., Эксперимент Томаса Юнга / Бурмистров В.В., Погребняк Г.Е.// Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона. 2012. № 1. С. 148-153.
 7. Саврухин А.П., Природа света / Саврухин А.П.// Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2014. Т. 18. № 4. С. 206-222.
 8. Рипп А.Г. Особенности организации дисциплины «Физический практикум» для студентов направления «Атомные станции». / Рипп А.Г., Матузаева О.В., Мирошниченко Е.В., Довгаленко В.В., Чернявская С.А.// Энергетические установки и технологии: науч. Журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2020. – Т. 6. - № 4, С. 33-37.
 - Lesnoy vestnik. 2014. Vol. 18. No. 4. P. 206-222.
 8. Ripp A.G. Features of the organization of the discipline "Physical workshop" for students of the direction "Nuclear power plants". / Ripp A.G., Matuzova O.V., Miroshnichenko E.V., Dovgalenko V.V., Chernyavskaya S.A.// Power installations and technologies: scientific. Journal. – Sevastopol: FSAOU IN SevSU, 2020. – Vol. 6. - No. 4, P. 33-37.

References

1. Alekhnovich V.I. Laboratory workshop on physical optics: textbook / Alekhnovich V.I., Kachurin Yu.Yu., I.N. Piotrovskaya [et al.]. — Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2016 - 173 p.
2. Born M., Fundamentals of optics / M. Born, E. Wolf; translated from English M.: Nauka, 1973. 720 p.
3. Mishchik S.A. Holistic and systemic physical image of the World / Mishchik S.A. // Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference "Concepts, theory and methodology of fundamental and applied scientific research" (Yekaterinburg, 02/13/2020). – Sterlitamak: AMI, 2020. – P. 11-13.
4. Trofimova T.I. Course of physics: textbook. manual for universities. – Ed. 9th, reprint. and additional – M.: Publishing center "Academy", 2004. – 560 p.
5. Jung T. On the interference of light and its manifestations / Golin G.M., Filonovich S.R. Classics of physical science. – M.: Higher School, 1989. – 576 p.
6. Burmistrov V.V., Pogrebnyak G.E., Thomas Jung experiment / Burmistrov V.V., Pogrebnyak G.E.// Complex problems of science development, education and economy of the region. 2012. No. 1. P. 148-153.
7. Savrukhin A.P., Nature of light / Savrukhin A.P.// Bulletin of the Moscow State University of Forests

УДК 004.896:620.179.11

Выявление различных повреждений поверхностей с использованием робототехники

А.В. Исаев¹, Т.В. Мозолевская¹, А.В. Андреев²¹ФГБВОУ ВО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова», Дыбенко Павла, 1А, г. Севастополь, 299028, Россия, alexey9588@yandex.ru,²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, avandreev@mail.sevsu.ru

Статья поступила 02.10.2023 г.; после доработки 04.10.2023 г.

Аннотация

Рассмотрены способы выявления различных повреждений поверхностей с использованием роботов.

Ключевые слова: выявление, повреждения, поверхности, робот.

Identification of various surface damages using robotics

A.V. Isaev¹, T.V. Mozolevskaya¹, A.V. Andreev²¹FGBVOU VO "Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P.S. Nakhimov", Pavel Dybenko, 1A, Sevastopol, 299028, Russia, alexey9588@yandex.ru, Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, avandreev@mail.sevsu.ru

Received 02.10.2023 y.; received in final form 04.10.2023 y

Abstract

Methods of detecting various surface damages using robots are considered.

Keywords: detection, damage, surfaces, robots.

Введение

Большинство используемых конструкций, как правило, претерпевают разрушение и деформацию, что обусловлено дефектами, которые вызваны коррозией, старением и механическими повреждениями, а также несоблюдением технологических процессов при их изготовлении. При несвоевременной диагностике и устранении указанные дефекты могут стать причиной техногенных аварий и катастроф на объектах. В связи с этим актуальной является задача диагностирования таких конструкций без их вскрытия и замены с целью своевременного предупредительного ремонта [1].

Изменения, происходящие внутри деформируемого материала, находят однозначное отражение в изменениях рельефа его поверхности

(рисунок 1). Оценка напряженно-деформированного состояния исследуемого материала может быть произведена по анализу этого рельефа. Поэтому изучение зарождения, развития и взаимодействия элементов микроструктуры на поверхности позволяет проследить динамику развития процессов, протекающих в исследуемом материале в целом [2, 3].



Рис. 1 Пример различных вариантов разрушения: 1 – хрупкое; 2 – вязкое; 3 – смешанное.

Для решения задач дефектоскопии, толщинометрии, структуроскопии и технической диагностики необходим выбор способа неразрушающего контроля, который зависит как от параметров контролируемого объекта, так и от условий его обследования. В зависимости от их потенциальной опасности дефекты делятся на малозначительные (допустимые) и критические (недопустимые). Последние подлежат обязательному обнаружению и незамедлительному устранению или исправлению. Наиболее грубыми дефектами являются макроскопические, часто видимые невооружённым глазом. Они представляют собой нарушения сплошности материала и особенно резко снижают прочность детали или конструкции [4].

В практике неразрушающего контроля имеет место использование роботизированных систем и комплексов, в том числе, ведущих российских компаний, таких как, Алтек, АКС, Кропус, МВТУ им. Баумана, Никимт-Атомстрой, ЭХО+ [5]. Далее, очевидно, возникает необходимость рассмотрения таких роботов и способов их применения.

Причём под роботизированной системой будем понимать систему, у которой есть два или более программно-управляемых привода, предназначенных для перемещения датчиков относительно объекта контроля или наоборот [6], а под неразрушающим контролем – метод контроля, при котором не нарушается пригодность объекта. Неразрушающий контроль обязателен при производстве и эксплуатации опасных промышленных объектов: трубопроводов, сосудов, транспорта и сооружений. Ограничимся здесь ультразвуковым, вихретоковым и телевизионным видами контроля, не вдаваясь в детали.

Зачем же нужны роботы в неразрушающем контроле? Роботы в неразрушающем контроле, прежде всего, заменяют человека: там, куда человек не влезет по причинам размеров (например, технологический канал реактора РБМК-1000 диаметром 82 мм или трубопровод Ду400 компрессорной станции); куда человек не полезет из-за опасных условий (корпус реактора АЭС; обшивка судна, стоящего в мокром доке); где требуется документирование результатов контроля с привязкой координат датчиков при движении или нужна принципиально высокая скорость контроля, в том числе однотипных изделий.

Также наиболее перспективный путь преодоления пресловутого человеческого фактора – это использование технологий искусственного

интеллекта при выполнении мероприятий по дефектовке и техническому контролю. Например, применение свёрточных нейросетей с глубоким обучением [7, 8] в микроскопическом анализе с целью устранения его недостатков, а в дальнейшем возможного уменьшения затрат, связанных с использованием в технике как гражданского, так и военного назначения материалов и узлов низкого качества.

Цель статьи

Рассмотреть способы выявления различных повреждений поверхностей с использованием роботов, в том числе, на базе искусственного интеллекта.

Ученые США создали роботизированного инспектора для определения повреждений в конструкциях. Автономный робот оснащен камерой для визуального обнаружения коррозии и трещин, георадаром для оценки поверхности и датчиками для определения корродирования металла. Робот является водонепроницаемым и способен сократить расходы на инспекцию и тщательно проверить наличие эрозии, фреттинга и питтинга в структуре с точностью до 96% [9].

Одновременно петербургскими инженерами проведены испытания робота РД-СКР, задачей которого является проводить диагностику днищ резервуаров с продуктами нефтепереработки и водой. Отличительной чертой методики работы является то, что не возникает необходимость останавливать работу машины котельной на долгое время, если, конечно, ей не требуется ремонт, в связи с тем, что от жидкого содержимого хранилища не нужно избавляться во время проведения исследования конструкции [10].

Робототехнический комплекс контролирует появление каких-либо повреждений или коррозии на днищах резервуаров, предназначенных для хранения воды, а также светлых продуктов нефтепереработки. Нет необходимости подготавливать поверхность емкости, чистить ее, опорожнять, так как процесс контроля можно совершать даже в том случае, если в резервуаре содержится жидкость. То есть появляется шанс обезопасить людей, работающих на предприятии, и не отправлять их внутрь для подготовки хранилища. К тому же, для вывода из рабочего состояния этого резервуара необходимо немало времени и затрат, что не так приятно для организации, использующей хранилище.

Экологическая сторона вопроса очень важна, так как при возможной протечке в баках

с темными либо светлыми продуктами нефтепереработки возникает большая опасность для окружающей среды.

Новшество в отечественной инженерии стало одинаково интересным как для компаний России (например, ГУП «ТЭК»), так и для организаций зарубежья: уже были получены запросы из США на проведение контроля хранилищ. Сам разработчик говорит, что при диагностике используются одновременно ультразвуковой и магнитный (MFL) способы обследования. Робот для диагностики резервуаров сделан из сочетания нержавеющей стали и алюминия. Данные материалы не относятся к искрящимся, поэтому машина может проводить проверку резервуара, который наполнен, например, керосином. Согласно требованиям взрывозащиты, для дополнительного исключения возможности появления искры происходит заполнение азотом внутреннего пространства объема. Ориентация установки происходит через сонар.

Стандартный процесс диагностики предполагает большие материальные затраты и длительное время, так как необходимо провести остановку работы резервуара, дренажирование содержимого, чистку и только после этого диагностировать емкость.

Если возникает необходимость в починке, хранилище ремонтируют, а затем закрывают и приводят в рабочее состояние. Новая технология помогает избежать потерю времени и материальных затрат, так как позволяет совершать диагностику, обходя стороной некоторые процессы. Для проведения осмотра 10-тысячного хранилища нужно пять дней; но если пользоваться традиционным методом диагностики, на это уходит значительно больше времени.

Сам процесс осмотра проходит таким образом: с помощью автокрана робота перемещают на крышу хранилища (в пример приводится бак-аккумулятор две тысячи кубометров объемом). После чего механизм фиксируется на горловине резервуара, заменяя, таким образом, крышку, открываются створки и установку погружают внутрь хранилища с помощью лебедки. По кабелю, связывающему робота с наружной стороной, происходит получение заряда, а в обратном направлении по проводу проходит сигнал (рисунок 2).

Процесс получения информации на компьютер напоминает процедуру УЗИ: связисты, которые находятся в этот момент в штабной машине, получают информацию в виде ультразвуковой картинки. Не смотря на то, что темпера-

тура воды в диагностируемом резервуаре составляла примерно 20°C, возможности робота её превышают и позволяют проводить осмотр в более горячей воде.

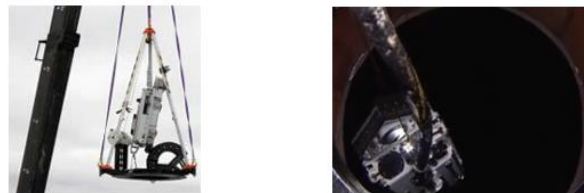


Рис. 2 Робот РД-СКР в процессе обследования ультразвуком и магнитным полем

Также стоит заметить, что данное предприятие работает над разработкой устройств для контроля внутренней части труб и ещё годом ранее один из таких роботов успешно прошёл испытание в тепловых сетях.

Роботы для внутритрубной диагностики

Для путешествий внутри трубы в потоке транспортируемой среды или под давлением воздуха (газа) часто применяются различные снаряды: измерительные, вихретоковые, магнитные, ультразвуковые. Но такие снаряды не относятся к нашей теме – роботизированным комплексам. Для того чтобы стать роботом нужно проявить активность и автономность. Хорошим примером такого шустрого «парня» является сканер-дефектоскоп А2072 (рисунок 3 а).

Решенные технологические задачи для такого робота: связь на основе WiFi, обеспечивающая расстояние передачи свыше 1 км; магнитные колеса-редукторы (усилие отрыва от ферромагнитной поверхности 60 кг) позволяют пробираться в тройники, зависать в потолочном положении; LiFe полимерные аккумуляторы емкостью 200 Вт*ч, обеспечивают до 8 часов автономной работы; 3-х осевой МЭМС-инклинометр фиксирует угловое положение (погрешность измерения $\pm 0,1^\circ$), что позволяет реализовать функции трассировки пройденного участка и автоматическое управление движением; блок ультразвукового контроля построен на базе преобразователей с сухим точечным контактом, то есть не нужно тащить с собой контактную жидкость. Низкая чувствительность таких датчиков компенсируется тем, что используется решетка из 32 элементов, работающих совместно. Конечно, присутствует телекамера с подсветкой для по-

иска посторонних предметов в трубах и выявления больших дефектов. Как приятная добавка – датчик метана на борту.

Ещё одно семейство роботов российской разработки ТДК-400-М-Л (рисунок 3 б) применяется не только в России, но и во Франции и США, что является не таким частым случаем. Особенности этих роботов следующие: в зависимости от исполнения пролезают в трубопроводы Ду200 – Ду1400; перемещение идёт на гусеничном ходу враспор; всё-таки питаются по кабелю длиной до 550 м, зато гарантировано будут извлечены из трубы в случае необходимости.



Рис. 3 а) робот для внутритрубной диагностики A2072;
б) внутритрубный робот ТДК-400-М-Л

Системы для телеинспекции трубопроводов Sigma с манипуляторами P150 и P200K (рисунок 4) позволяют проводить телевизионный контроль, измерение деформации, отслеживание трассы труб внутренним диаметром от 150 мм. Их особенности отмечены так: дополнительная камера заднего вида; устройство намотки кабеля, синхронизированное с движением робота; защита от опрокидывания.



Рис. 4 Манипуляторы P150 и P200K

Задача внутритрубной диагностики автономными роботами весьма актуальна – на военных и других ответственных объектах в России тысячи километров трубопроводов, которые не могут быть проконтролированы традиционными внутритрубными снарядами.

Роботы для контроля трубопровода снаружи

Другой пример контроля основного металла и сварных швов труб при эксплуатации – сканер-

дефектоскоп АВТОКОН-МГТУ (рисунок 5), который, как видно из названия, разработан в МГТУ (МВТУ) им. Баумана. Только этот сканер автономно перемещается по наружной стороне трубы, вдоль трубы или по её окружности. Данные тоже передаются на управляющий компьютер по WiFi. У него два ведущих магнитных колеса, аккумуляторы и блоки с ультразвуковыми датчиками для контроля сварного шва с обеих сторон. Его особенность в том, что он тащит на себе баллончики с густой смазкой, которая постепенно подаётся под ультразвуковые датчики.

Интересная задача для подобных роботов, которые ползают по трубе изнутри или снаружи – отслеживать и контролировать позицию относительно валика усиления сварного шва. Потому что промах означает, что контроль не был проведен полноценно. Точность позиционирования зависит от методики контроля и толщины стенки трубы, и желательно, чтобы она составляла до 1/4 толщины.



Рис. 5 Сканер-дефектоскоп «Автокон»

Наиболее простым в реализации, однако, не самым дешевым способом выглядит применение лазерного триангуляционного профиломера. По измерениям профиля валика усиления шва без труда определяются его границы и отклонение центра от желаемого. Рисунок 6 поясняет, как выглядят исходные данные профилометрии.

Другой способ состоит в том, что лазерная линия проецируется простой указкой, а относительно дешевая видеокамера снимает профиль и управляющий компьютер пытается рассчитать профиль подобный показанному выше по видеоизображению (облако точек). На практике требуемая точность позиционирования вполне может быть достигнута.

Третий вариант, хронологически более ранний, – применять магнитные датчики по обеим сторонам сварного шва, как это и сделано в сканере «Автокон». На практике неоднократно от-

мечалось, что если неудачно установить исходное положение относительно шва, то сканер может шов потерять и поехать совсем не туда, куда надо.

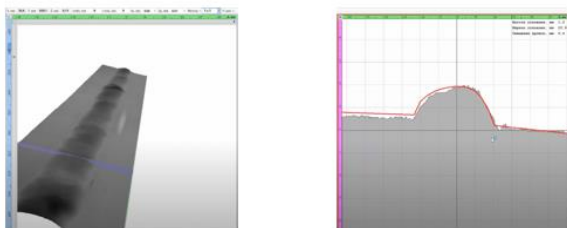


Рис. 6 Построение профиля сварного шва лазерным триангуляционным датчиком

Подводные роботы

Для обследования корпусов судов применяется подводный робот, разработанный в МВТУ им. Баумана (рисунок 10). Робот имеет восемь винтов, может маневрировать в подводном положении. Пристыковавшись к корпусу судна за счет прижимного винта, робот перемещается по обшивке с помощью колёс. Робот несёт и зачистную машинку для подготовки участка для ультразвуковой толщинометрии.

Задачи для подводных роботов обещают быть обширными и разнообразными в связи с планами освоения шельфов в Ледовитом и Тихом океане. Здесь планируются целые подводные «города» для добычи газа. В том числе и потребуется делать диагностику оборудования и трубопроводов. Проблемы, которые встанут перед такими роботами во многом навигационные – борьба с течением, мутной водой, биообрастанием.



Рис. 10. Подводный робот МВТУ

Решенные технологические задачи для подобных систем такие: высокая скорость движе-

ния объекта контроля (более 100 мм/с) для обеспечения требуемой производительности; перемещение датчиков по траектории, считанной из CAD модели объекта; автоматическая сортировка изделий на дефектные и бездефектные; краскопульты для автоматической маркировки дефектных участков; «акустический глаз» в иммерсионных системах для выставления точного расстояния от ультразвуковых датчиков до поверхности объекта.

Выводы

Потребности российской промышленности, в роботизированном неразрушающем контроле, есть и продолжают расти, учитывая, что во многих отраслях на уровне нормативных документов приоритет отдается автоматизированным методам;

в борьбе за снижение влияния человеческого фактора, для увеличения производительности и информативности контроля применяется разнообразное оборудование, в том числе и разработанное в России; это вполне соответствует понятию «Индустрия 4.0» (NDT 4.0);

разработчики стараются оснастить роботов наибольшим количеством датчиков, реализующих разные виды контроля одновременно.

Таким образом, перед разработчиками стоит актуальная задача – сделать перемещение быстрее, точнее, самих роботов сделать меньшего размера или увеличить их автономность, а также наращивания элементов искусственного интеллекта для улучшения качества выявления различных повреждений поверхностей.

Список литературы

1. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
2. Васьул Х. Практическая металлография. – М.: Металлургия, 1988 – 320 с.
3. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, П.В. Макаров и др. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – 298 с.
4. Боровиков А.С., Горбунов В.И., Гурвич А.К. Справочник: Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. – М.: Машиностроение, 1975. – 392 с.
5. Базулин А. Российские роботы для неразрушающего контроля: какие они бывают? URL: <https://habr.com/ru/articles/566000.html> (дата обращения: 10.10.2023).
6. ГОСТ Р ИСО 8373-2014. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. М.: – Стандартинформ, 2015. – 20 с.

7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
8. Николенько С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.
9. Низамутдинов Р. Ученые создали робота для определения коррозии и повреждений. URL: <https://tdnu.ru/article/science/uchenye-sozdali-robota-dlya-opredeleniya-korrozii-i-povrezhdenij.html> (дата обращения: 10.10.2023).
10. На территории «ТЭК Санкт-Петербурга» было проведено испытание робота для диагностики крупных резервуаров. URL: <https://storage-tanks.ru/novyie-tehnologii/na-territorii-tek-sankt-peterburga-byilo-provedeno-isyitanie-robota-dlya-diagnostiki-krupnyih-rezervuarov.html> (дата обращения: 04.04.2023).

References

1. Geller YU.A., Rachstadt A.G. Materials science. – М.: Metallurgy, 1975. – 448 p.
2. Vashul H. Practical metallography. – М.: Metallurgy, 1988 – 320 p.
3. Physical mesomechanics and computer design of materials: In 2 volumes / V.E. Panin, V.E. Egorushkin, P.V. Makarov, etc. – Novosibirsk: Nauka, 1995. – Vol. 1. – 298 p.
4. Borovikov A.S., Gorbunov V.I., Gurvich A.K. Handbook: Devices for non-destructive testing of materials and products. – М.: Mechanical Engineering, 1975. – 392 p.
5. Bazulin A. Russian robots for non-destructive testing: what are they like? URL: <https://habr.com/ru/articles/566000.html> (date of application: 10.10.2023).
6. GOST R ISO 8373-2014. Robots and robotic devices. Terms and definitions. М.: – Standartinform, 2015. – 20 p.
7. Haikin S. Neural networks: a complete course. – М.: Williams, 2006. – 1104 p.
8. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. Deep learning. – St. Petersburg: Peter, 2018. – 480 p.
9. Nizamutdinov R. Scientists have created a robot to detect corrosion and damage. URL: <https://tdnu.ru/article/science/uchenye-sozdali-robota-dlya-opredeleniya-korrozii-i-povrezhdenij.html> (date of application: 10.10.2023).
10. On the territory of the "Fuel and Energy Complex of St. Petersburg", a robot was tested to diagnose large tanks. URL: <https://storage-tanks.ru/novyie-tehnologii/na-territorii-tek-sankt-peterburga-byilo-provedeno-isyitanie-robota-dlya-diagnostiki-krupnyih-rezervuarov.html> (date of application: 04.04.2023).

УДК 621.039.5:699.841:624.042.8

Классификация огибающей доплеровского сигнала для возможной идентификации объекта

Е.А. Контылева¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, eakontyleva@sevsu.ru

Статья поступила 17.10.2023 г.; после доработки 25.10.2023 г.

Аннотация

В статье рассматриваются частотно-временные параметры отраженных от объектов доплеровских сигналов, формирование признаков пространства, для практического применения в задачах распознавания и классификации сигналов на основе выделения отношения энергии распределяемой на частотные полосы.

Ключевые слова: радиотехнические сигналы, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, вейвлет, огибающая.

Classification of the Doppler signal envelope for possible object identification

E.A. Kontyleva¹

¹Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
eakontyleva@sevsu.ru

Received 17.10.2023 y.; received in final form 25.10.2023 y.

Abstract

The article discusses the frequency-time parameters of Doppler signals reflected from objects, the formation of space features, for practical use in problems of recognition and classification of signals based on the allocation of the ratio of energy distributed into frequency bands.

Keywords: radio signals, Fourier transform, wavelet transform, wavelet, envelope.

Введение

Распознавание и обнаружение движущихся объектов находит широкое применение в разнообразных отраслях промышленности, особенно в системах безопасности. Для решения данных задач используются передовые технологии, основанные на оптических и радиосигналах.

Разработки, построенные на основе радиотехнических сигналов, использующих эффект Доплера, преимущественно предназначаются для определения расстояния до объекта. В тоже время проблема классификации движения объектов без визуального контакта с ним практически не решена.

Одним из важных способов защитить информацию от хищения и уничтожения, несанкционированного доступа и причинения вреда естественному процессу документооборота и обмена данными, рассматривается автоматическое выявление и распознавание объектов при отсутствии визуального контакта.

Главная задача защиты информации заключается в создании таких условий, при которых усложняется или становится невозможным проникновение злоумышленника к защищаемой информации.

В Федеральном законе от 27 июня 2006 г № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» описаны ос-

новные термины, требования к защите информации, ответственность за нарушения при работе с ней, информация (различные данные, сведения, сообщения, представленные в любой форме) и хранитель информации (сотрудники обязаны защищать ее, исключать доступ третьих лиц и ограничивать доступ к информации при обмене данными) [4].

Постановка задачи

В статье рассматривается возможность классификации огибающей доплеровского сигнала для идентификации объектов без визуального контакта.

Для решения этой задачи выбраны различные методы преобразования Фурье, дискретного вейвлет-преобразования и основного вейвлет-преобразования с использованием явления микро-Доплера.

Под феноменом микро-Доплера понимается дополнительная модуляция отраженного сигнала, возникающая при различных движениях объекта, помимо основного движения [10]. Любые движения объекта вызывают изменения спектра частотной полосы (частотную модуляцию огибающей отраженного радиолокационного сигнала).

На протяжении нескольких десятилетий цены на высокочастотное оборудование и комплектующие начали снижаться, что повлекло спрос в различных областях применения радаров [5].

Благодаря выделению боковых лепестков в спектре отраженного сигнала можно определить как основное, так и ускоренное движение частей объекта. Им может быть: пешеход, городской транспорт, летательные аппараты и спутники [4]. Направление движения существенно влияет на смещение и размер частоты, на которые, в свою очередь, накладывает влияние частотный сдвиг. Увеличение частоты отраженного сигнала при удалении и приближении объекта - главное отличие эффекта Доплера.

Созданный комплекс доплеровских сдвигов, благодаря движениям объекта, применяется для определения огибающей.

Используя преобразование Фурье можно получить уровень и начальную фазу гармонического колебания в зависимости от частоты. Это преобразование используется для обработки спектра сигнала [12].

Однако во время проведения исследования было выявлено, что колебания гармоник периодические и неизменны во времени [5], поэтому

преобразование Фурье не подходит для получения информации об особенностях сигнала ограниченного по времени. Для обработки данных сигналов применяется метод оконного преобразования Фурье, который позволяет выделить интересующий сегмент сигнала и произвести соответствующие вычисления преобразования Фурье.

Этот подход также используется для реализации дискретного преобразования Фурье для каждого участка. Заданную оконную функцию множим на выделенное звено из отсчетного сигнала участка. Оконная функция позволяет плавно уменьшать сигнал на краях области, выделенной в окне, чтобы устранить эффект расширения спектра. Применение специальных оконных форм позволяет снизить влияние весовых искажений в конечных и начальных частях сигнала. Следовательно, для сохранения формы и спектра сигнала необходимо использовать достаточно широкие окна [4].

Основным свойством вейвлет-преобразования является функциональная декомпозиция сигнала в пространственно-временной области, что позволяет определить его качественные характеристики [11]. В вейвлет-анализе важную роль играет понятие скалограммы [6]. Это двумерное изображение, отображающее одномерные функции в частотно-временной области. При выборе вейвлета следует учитывать его небольшой спектр. Различие отображения сигнала в вейвлет-преобразовании и в оконном преобразовании Фурье заключается в том, что в первом случае отображение происходит в масштабно-временном пространстве, а во втором – в частотно-временном.

Проанализируем выбранные вейвлет-преобразования.

В дискретном вейвлет-преобразовании радиосигнал делится по ортонормированному базису, по аналогии разложения в тригонометрический ряд, складывающийся из разночастотных функций. Преимуществом дискретных вейвлет-преобразований является ортогональность размерных функций. Она используется для оценки размеров аликутов, когда разделение радиосигналов на одномерном базисе не соответствует требованиям. Вейвлеты формируют основу ортонормированных функций, а сигнал имеет вид линейной комбинации функций [7].

Дискретное вейвлет-преобразование состоит из комплекса размерных функций и многомерных функций сдвига, которые должны быть ортогональны остальным размерным функциям сдвига того же размера с интегралом равным 1.

Материнское вейвлет-преобразование представляет собой метод анализа сигнала в частотно-временной области. Оно позволяет определить наилучшие параметры, учитывающие размеры окон как по времени, так и по частоте, а также область применения вейвлета в частотно-временном окне.

Обратившись к рассмотрению различных публикаций, мы выбрали как пакетные, так и непрерывные материнские вейвлеты. Для выявления ключевых особенностей объекта движения, мы взяли материнский вейвлет Морле. Такой выбор обеспечивает возможность определения размера и основной частоты, которые в свою очередь влияют на ширину окна, необходимого для решения поставленной задачи.

Проведенные исследования

С целью получения данных о сигнале и последующего его анализа, было создано специальное устройство, способное обеспечить получение необходимой информации и обработку ее в дальнейшем, (см. рисунок 1).

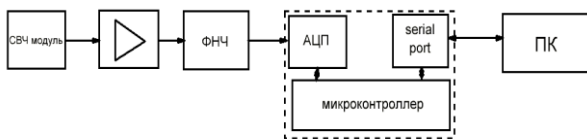


Рис. 1. Структурная схема устройства распознавания признаков движения объекта

Проанализировав литературу и исследования, определили классификацию огибающей доплеровского сигнала, которая позволит идентифицировать объект без визуального контакта с ним. Полученную классификацию поделим на алгоритмы самообучения и присвоения класса.

В параметры алгоритма самообучения входят:

1. Радиолокационные системы.
2. Вейвлет-функция.
3. Масштабирующая функция и ее коэффициенты.
4. Число уровней вейвлет-пакетного разложения.

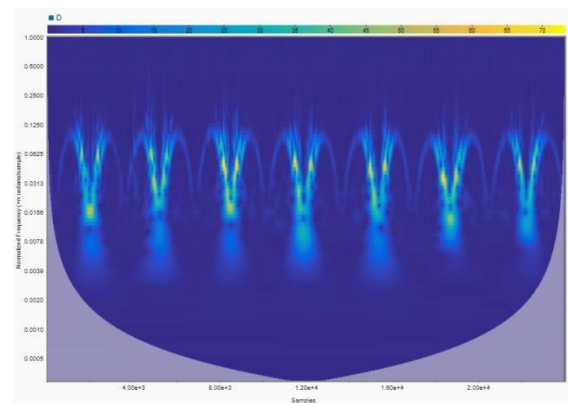
В параметры алгоритма присвоения класса входят:

- Параметры алгоритма обучения и его результаты работы.
- Параметр, представляющий данные о классовой границе.
- Построчные сравнения рассчитанного вектора с параметрами матрицы.

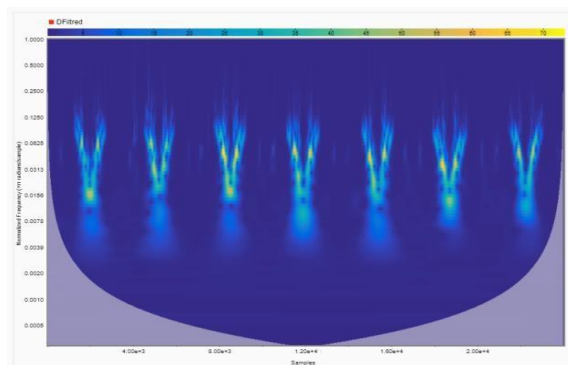
- В известный коэффициент входит информация о движении.

В результате исследования выяснилось: преобразование Фурье не подходит для поставленной задачи;

на одном уровне масштаба непрерывное вейвлет-разложение приводит к потере сигнала с низкочастотными компонентами, являющиеся основой радиолокационных сигналов; с помощью вейвлет-пакетной декомпозиции сигнала, возможно визуально различать различные движения.



а)



б)

Рис. 2. Скалограмма приближения (удаления) объекта:

а) без фильтра; б) после фильтрации

Заключение

Анализ предоставленных данных позволил определить, что огибающая Доплеровского сигнала может использоваться для идентификации объекта без необходимости визуального контакта. С применением вейвлет-пакетной декомпозиции сигналов возможно наглядное различие различных типов движения.

Так как движения объекта уникальны, возможна полная идентификация движущихся объектов.

Список литературы

1. Moeness G. Amin. Radar for indoor monitoring [Текст] // Moeness G. Amin. – New York: Taylor & Francis Group – 2018. – 381 P. 21.
2. Victor C. Chen. Micro-Doppler Effect in Radar: phenomenon, model, and simulation study [Текст] / Victor C. Chen, Fayin Li, Shen-Shyang Ho, Harry Wechsler // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 2006. – Vol. 42, № 1. – P. 1-19.
3. Boulic, R. A global human walking model with real-time kinematic personification [Текст] / R.N. Boulic, N. Thalmann, D. Thalmann // The visual computer. – 1990. – Vol. 6, № 6. – P. 344–358.
4. Контылева Е.А., Авдеев И.В. Разработка метода классификации огибающей доплеровского сигнала // Энергетические установки и технологии. – 2023. – Т. 9. № 1. – С. 160-164.
5. Травин, М.Г. Вейвлеты для инженеров [Текст] // М.Г. Травин, В.М. Терешко, Г.А. Травин – Белгород: Политерра – 2007. – С. 156-160
6. Цуканов Ю. В. Научно – техническое руководство по цифровой обработке сигналов // Научно – технический центр по электронным компонентам и современным технологиям; «АВТЭКС» Санкт – Петербург, 2013. – 12 с. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://www.autex.spb.ru> (дата обращения: 15.04.2019).
7. Одиноченко Н.М. Использование алгоритмов быстрого преобразования Фурье и адаптивного взвешивания при обработке радиолокационных сигналов
8. Сайфуллин, Р.Т. Вейвлет-анализ в обработке сигналов аналитических приборов [Текст] // Р.Т. Сайфуллин, А.А. Наумов / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т.1, №1(2). – С. 2-5.
9. Асхатов, Р.А. Обоснование выбора материнского вейвлета непрерывного вейвлет-преобразования для анализа речевых сигналов [Текст] / Р.А. Асхатов, А.Н. Голубинский. // Наука и современность: сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции: Новосибирск, – 2012. – №2. – С. 3-6.
10. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразования [Текст] // А.Н. Яковлев / Учебное пособие: Новосибирск, – 2003. – С. 11-14.
11. Астахов Н. В. и др. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье // Радиотехника. – 2019. – Т. 83. – №. 6. – С. 109-112.
12. Крючков И. В. и др. Пространственно-спектральная обработка в mimo рлс малой дальности с цифровым обзором по углу места // Радиолокация и радиосвязь. – 2020. – С. 119-123.
13. Кошелев, В. И. "Методы и алгоритмы цифрового спектрального анализа сигналов." (2021): 144-

144.

References

1. Moeness G. Amin. Radar for indoor monitoring [Text] // Moeness G. Amin. – New York: Taylor & Francis Group – 2018. – 381 P. 21.
2. Victor C. Chen. Micro-Doppler Effect in Radar: phenomenon, model, and simulation study [Text] / Victor C. Chen, Fayin Li, Shen-Shyang Ho, Harry Wechsler // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 2006. – Vol. 42, No. 1. – P. 1-19.
3. Boulic, R. A global human walking model with real-time kinematic personalization [Text] / R.N. Boulic, N. Thalmann, D. Thalmann // The visual computer. – 1990. – Vol. 6, No. 6. – P. 344-358.
4. Kontyleva E.A., Avdeev I.V. Development of a method for classifying the envelope of a Doppler signal // Power plants and technologies. – 2023. – Vol. 9. No. 1. – pp. 160-164.
5. Travin, M.G. Wavelets for engineers [Text] // M.G. Travin, V.M. Tereshko, G.A. Travin – Bel-city: Polytterra – 2007. – pp. 156-160
6. Tsukanov Yu. V. Scientific and technical manual on digital signal processing // Scientific and Technical Center for Electronic Components and Modern Technologies; "AUTEX" St. Petersburg, 2013. – 12 p. [electronic resource]. Systems. Requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://www.autex.spb.ru> (date of publication: 15.04.2019).
7. Odinenko N.M. The use of algorithms for fast Fourier transform and adaptive weighting in the processing of radar signals
8. Sayfullin, R.T. Wavelet analysis in signal processing of analytical instruments [Text] // R.T. Sayfullin, A.A. Naumov / Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – Vol.1, No. 1(2). – pp. 2-5.
9. Asshatov, R.A. Substantiation of the choice of a material wavelet of a continuous wavelet transform for the analysis of speech signals [Text] / R.A. Asshatov, A.N. Golubinsky. // Science and Modernity: collection of materials of the XIX International Scientific and Practical Conference: Novosibirsk, - 2012. – No.2. – pp. 3-6.
10. Yakovlev, A.N. Introduction to wavelet transformations [Text] // A.N. Yakovlev / Textbook: Novosibirsk, – 2003. – pp. 11-14.
11. Astakhov N. V. et al. Time-frequency analysis of non-stationary signals by methods of wavelet transform and window Fourier transform //Radio engineering. – 2019. – Vol. 83. – No. 6. – pp. 109-112.
12. Kryuchkov I. V. et al. Spatial-spectral processing in mimo of a short-range radar with a digital view of the angle of the place //Radar and radio communication. – 2020. – pp. 119-123.
13. Koshelev, V. I. "Methods and algorithms of digital spectral analysis of signals." (2021): 144-144.

УДК 531/534:37.091.3

Изменение методического подхода к изучению одного из разделов теоретической механики для студентов направления подготовки 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг»

Н.К. Корнеева¹

¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, korneeva_nk@mail.ru

Статья поступила 01.11.2023 г.; после доработки 03.11.2023 г.

Аннотация

В статье рассматриваются особенности преподавания одного из разделов теоретической механики в ВУЗе для студентов направления 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг». Рассматриваются три методики чтения первого основного раздела теоретической механики «Статика». Производится сравнительный анализ этих методик. Сформулированы основные достоинства каждой из методик.

Ключевые слова: теоретическая механика, метод Пуансо, аксиомы статики, законы Ньютона, эквивалентные системы, главный вектор, главный момент.

Changing the methodological approach to the study of one of the sections of theoretical mechanics for students of the field of study 05.14.02 "Nuclear power plants: design, operation and engineering"

N.K. Korneeva¹

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, korneeva_nk@mail.ru.

Received 01.11.2023 y.; received in final form 03.11.2023

Abstract

The article discusses the features of teaching one of the sections of theoretical mechanics at a university for students of the direction 14.05.02 "Nuclear power plants: design, operation and engineering". Three methods of reading the first main section of theoretical mechanics "Statics" are considered. A comparative analysis of these methods is carried out. The main advantages of each method are formulated.

Keywords: theoretical mechanics, Poinso's method, axioms of statics, Newton's laws, equivalent systems, principal vector, principal moment.

Введение

Повышение качества подготовки будущих инженеров АЭС в значительной степени зависит от постановки преподавания фундаментальных дисциплин, к которым относятся теоретическая механика.

Для повышения эффективности учебного процесса одной из важнейших задач, стоящих

перед современным педагогом является модернизация курса теоретической механики.

Современная сложная техника, с которой приходится иметь дело выпускнику университета, ставит перед общенаучными кафедрами задачу повышения теоретического уровня будущих инженеров. На усвоение материала рассматриваемого в курсе теоретической механика влияет наглядность изложенного материала.

Необходимо учитывать невозможность увеличения объема курса теоретической механики.

Встаёт задача о необходимости донести до студентов материала в компактной форме, при этом, не потеряв качества усвоения.

Постановка задачи

Целью работы является выявление особенностей компактности изложения теоретической механики для студентов направления подготовки 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг».

Три различных метода построения и организации преподавания первого раздела теоретической механики «Статика»

При любой методике прохождения раздела «Статика» необходимо, чтобы были решены две ее основные задачи:

- Установление условий равновесия системы сил, действующих на абсолютно твердое тело;
- приведение неуравновешенной системы сил к каноническому виду. [2]

Суть каждой из методик состоит в следующем.

Первая методика

Она предусматривает традиционный метод изложения статики, в основе которого лежит метод Пуансо приведения системы сил к простейшему виду.

В качестве основной теоремы принимается теорема об эквивалентности системы сил силе и паре сил. Доказательство этой теоремы требует предварительно рассмотреть так называемые аксиомы статики и теорию пар сил.

Заметим, что из принятой основной теоремы вытекает следствие - принцип эквивалентности: две системы сил эквивалентны тогда и только тогда, когда их характеристические величины, то есть главный вектор и главный момент, для одного и то же центра одинаковы.[1]

Вторая методика

Ее отличие состоит в том, что в качестве основного положения используется принцип эквивалентности двух систем сил. Но доказательство этого принципа опирается на общепринятые аксиомы. Из них следует четыре операции над силами, которые позволяют доказать в качестве ос-

новной теоремы статики теорему об эквивалентности произвольной системы сил двум силам. Во второй методике больше внимания уделяется рассмотрению понятий главного вектора и главного момента системы сил, как важнейших характеристик совместного действия сил на твердое тело. Здесь же вводится понятие центральной оси системы сил как геометрического места полюсов, для которых главный момент данной системы сил коллинеарен ее главному вектору или равен нулю. В дальнейшем геометрический способ построения центральной оси используется при приведении системы сил к равнодействующей и динамическому винту. В первом случае центральная ось будет определять линию действия равнодействующей, во втором – ось винта.

Показав инвариантность характеристических величин по отношению к элементарным операциям, можно очень быстро и наглядно получить условия равновесия системы сил.

В основе приведения неуравновешенной системы сил к каноническому виду лежит принцип эквивалентности. Он не постулируется, а доказывается с помощью элементарных операций над силами следуемых из аксиом.

Достоинство второй методики состоит в том, что он дает простой способ распознавания эквивалентных систем и возможность замен одной системы более простой и более удобной.

Применяя данный метод можно выяснить основные свойства пар сил и доказать теоремы о приведении системы сил к равнодействующей и динамическому вектору.

Третья методика

Как и во втором варианте, за основное положение принимается принцип эквивалентности двух сил. Существенным методом в данном построении статики является полный отказ от аксиом. Это не позволяет доказать принцип эквивалентности средствами статики, но его достаточно легко получить в дальнейшем, как следствие из общих теорем динамики. Вместо аксиом статики предусматривается изложение трех законов Ньютона и двух дополнительных – закона независимости действия сил и закона освобождения от связей.

Помимо принципа эквивалентности формулируется принцип инерции: если твердое тело, находящееся в равновесии не подвергается действию сил, то оно сохраняет свое состояние.[2]

Принцип инерции не тождественен первому

закону Ньютона (закону инерции). Закон Ньютона относится к материальной точке и принимается как аксиома. Принцип инерции не является законом механики, а легко доказывается с помощью общих теорем динамики.

Специфическим понятие в данной методике является понятие нулевой системы сил – системы, не содержащей ни одной силы.

Введение нулевой системы позволяет установить справедливость следующих предложений:

- нулевая система - система уравновешенная;
- характеристические величины нулевой системы – главный вектор и главный момент для любого полюса равны нулю;
- любая система сил с нулевыми характеристиками является уравновешенной.

Вывод

Достоинства первой методики.

Данная методика позволяет убедить студентов направления подготовки 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», что статика не является обособленной частью механики, а логически связана с динамикой. Так как все основные положения статики вытекают из общих законов механики, к которым относятся три закона Ньютона, закон Лагранжа о независимости действия сил и закон освобожденности от связей.

Достоинства второй и третьей методики.

1. Четкое выделение элементарных операций над силами.
2. Простота определения условий равновесия системы сил.
3. Введение принципа эквивалентности в качестве основного принципа статики.
4. Возможность эффективного рассмотрения теории пар сил, без привлечения специфических теорем.

Недостатки первой методики.

Несмотря на простоту данный вариант изложения страдает существенным недостатком:

- изложение аксиом и теории пар занимает сравнительно много учебного времени.

Недостатки второй методики.

Сохранение общепринятых систем приводит к обособлению статики от других разделов механики.

Заключение

Для изучения теоретической механики у студентов направления подготовки 14.05.02

«Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» выделено наибольшее количество часов, по сравнению с другими специальностями. При использовании первой методики, изложенный материал лучше воспринимается и усваивается студентами. Поэтому целесообразно использование первой методики.

Список литературы

1. Бугаенко Г.А. Механика: учебник для вузов/ Г.А. Бугаенко, В.В. Маланин, В.И. Яковлев. — 2-е изд., испр. и доп.— Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 368 с.
2. Прусов В.М., Наголюк Л.О. Статика в вопросах и ответах: учебное пособие — Севастополь: СНУЯЭиП, 2006.-100 с.

References

1. Bugaenko, G. A. Mechanics: a textbook for universities / G. A. Bugaenko, V. V. Malanin, V. I. Yakovlev. — 2nd ed., rev. and additional - Moscow: Yurayt Publishing House, 2022. - 368 p.
2. Prusov V.M., Nagolyuk L.O. Statics in questions and answers: textbook - Sevastopol: SNUYAEiP, 2006.-100 p.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 662.739

Исследование процессов зажигания и горения водоугольной суспензий с использованием пирогенетической жидкости

А.Ж. Калтаев¹, В.Е. Губин^{1,2}, К.Б. Ларионов^{1,3}, А.В. Губин²¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, 634050, Россия, e-mail: azk2@tpu.ru²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия, e-mail: gubin@tpu.ru, avg77@tpu.ru³ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева», Кемерово, 650000, Россия, e-mail: laryk070@gmail.com

Статья поступила 13.11.2023 г.; после доработки 14.11.2023 г.

Аннотация

В работе представлены результаты исследования влияния пирогенетической жидкости из различной биомассы на зажигание и горение водоугольной суспензии. В качестве твердого топлива использовали отходы обогатительной фабрики – фильтр-кек. При частичной замене технической воды на пирогенетическую жидкость, время задержки зажигания водоугольной суспензии было снижено от 5,9% до 20,0% в зависимости от типа биомассы. В то же время низшая теплота сгорания водоугольной суспензии на основе пирогенетической воды была увеличена от 3,0 МДж/кг до 3,8 МДж/кг в зависимости от биомассы. В т.ч. было установлено, что факел в процессе горения водоугольной суспензии на основе пирогенетической жидкости более стабилен.

Ключевые слова: фильтр-кек, пирогенетическая жидкость, пиролиз, горения, водоугольная суспензия.

Investigation of ignition and combustion processes of water-coal slurry using pyrogenetic liquid

A.Zh. Kaltaev¹, V.E. Gubin^{1,2}, K.B. Larionov^{1,3}, A.V. Gubin²¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia, e-mail: azk2@tpu.ru²Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: gubin@tpu.ru, avg77@tpu.ru³T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russia, e-mail: laryk@tpu.ru

Received 13.11.2023 y.; received in final form 14.11.2023 y.

Abstract

The paper presents the results of the study of the influence of pyrogenic liquid from different biomass on the ignition and combustion of water-coal slurry. Waste from the enrichment plant - filter cake - was used as solid fuel. When technical water was partially replaced by pyrogenetic liquid, the ignition delay time of the charcoal slurry was reduced from 5.9% to 20.0%, depending on the biomass type. At the same time, the lower calorific value of the pyrogenetic water-based coal slurry was increased from 3.0 MJ/kg to 3.8 MJ/kg, depending on the biomass. Among other things, the flare was found to be more stable during the combustion of the pyrogenetic water-based water-coal slurry.

Keywords: filter cake, pyrogenetic liquid, pyrolysis, combustion, water-coal slurry.

Введение

В настоящее время в мире устойчивая энергосистема является одним из самых главных

критериев безопасности.

В связи с ежегодным ростом энергопотребления [1] полноценный переход от ископаемого

топлива к возобновляемым источникам энергии по оптимистичным оценкам осуществиться только к 2050 году [2]. При этом одним из самых перспективных и стабильных возобновляемых источников энергии является биомасса [3]. Однако прямое сжигание биомассы является неэффективным ввиду низкой удельной энергоёмкости и насыпной плотности в сравнении с традиционным ископаемым топливом [4]. Также биомасса подвержена разложению при длительном хранении, поэтому её необходимо хранить в сухом отапливаемом помещении [5]. Данные недостатки затрудняют прямое применение биомассы в качестве топлива. Использование термических методов конверсии позволяет получить энергоёмкие продукты удобные для транспортировки и применения [6]. К термическим методам конверсии относятся: торрефикация, пиролиз, гидротермальное сжижение и газификация [6]. Наибольшее распространение среди перечисленных методов получили методы пиролиза и газификации [7]. Для конверсии биомассы более подходящим процессом является пиролиз, так как биомасса полностью разлагается при низких температурах (400-500 °C) [8]. Основными продуктами пиролиза являются полукокс и жидкие углеводороды.

Полукокс используется в качестве печного топлива, сорбента, также может применяться в качестве сырья для синтеза различных материалов. Жидкие углеводороды представляют воду, спирты, фенолы, жидкие кислоты и другие органические соединения [9]. Из-за наличия воды и водорастворимых примесей, происходит расслоение на два типа жидкости с различной плотностью: водную и органическую [10]. Водная - пирогенетическая жидкость или подсмольная вода [11], органическая часть относится к жидким углеводородам [9]. Состав двух фаз достаточно сложен и состоит из полярных веществ (жидкие углеводороды) и легкой органики (пирогенетическая жидкость) [12]. В составе могут присутствовать соединения, относящиеся к различным химическим семействам, такие как углеводороды, эфиры, кетоны, кислоты, альдегиды, фенолы, сахара и др. [12]. Состав пирогенетической жидкости и жидких углеводородов в значительной степени зависит от типа биомассы [13]. С точки зрения энергетики жидкие углеводороды термической переработки биомассы являются ценным продуктом, теплота сгорания которых достигает до 40 МДж/кг, что сопоставимо с топочным мазутом марки М-100 согласно ГОСТ 10585-2013. В свою очередь пирогенетическая

жидкость несмотря на наличие технологического потенциала в химической промышленности не получила широко применения и является «балластовой» составляющей данного вида топлива. Наличие спиртов, фенолов, кетонов и других соединений, затрудняет прямую утилизацию пирогенетической жидкости. Также ее сжигание невозможно ввиду низкого значения теплотворной способности от 0,1 МДж/кг до 4,0 МДж/кг и большого количества содержащейся воды (до 90%).

Однако применение её в составе с многокомпонентным топливом решает данную проблему. Наиболее подходящим многокомпонентным топливом является водоугольная суспензия (ВУС). Существует множество исследований по применению различных добавок для улучшения характеристик ВУС [14], в частности применения жидких углеводородов термической переработки отходов [15] и пирогенетической жидкости [16]. Широко изучено влияние пирогенетической жидкости на реологические свойства [16], характеристики процессов зажигания, горения [17] и распыла [18]. Однако в существующей научно-технической литературе отсутствует информация о влиянии пирогенетической жидкости, полученной из различных типов биомассы на характеристики процессов зажигания и горения.

В данном исследовании были изучены характеристики процессов зажигания водоугольной суспензии, выполненного на основе пирогенетической жидкости, полученной из различных типов биомассы: сосновые опилки, солома, навоз, скорлупа кедрового ореха и отходы пивного производства. Также представлен материальный и энергетический балансы процесса термической переработки биомассы.

Материалы и методы

В качестве основного (твердофазного) компонента ВУС использовали фильтр-кек (рисунок 1) полученный путем флотации угля марки Г и Ж на обогатительной фабрике шахты имени Кирова. Технические характеристики (влажность, зольность, выход летучих и теплотворная способность) проводилась согласно стандартным методикам: ГОСТ 33503–2015 “Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе”, ГОСТ Р 55661–2013 “Топливо твердое минеральное. Определение зольности”, ГОСТ 55660-2013 “Топливо твердое минеральное. Определения выхода летучих веществ”, ГОСТ 147-2013 “Топливо твердое минеральное.

Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания». Технические характеристики фильтр-кека представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики фильтр-кека

Характеристика	Значение
W^r , мас%	14,6
A^d , мас%	32,6
V^{daf} , мас%	40,4
Q_r^r , МДж/кг	22,1

^{r} – рабочее состояние, ^{d} – сухое состояние,
 ^{daf} – сухое беззольное состояние



Рис.1. Внешний вид фильтр-кека

Фильтр-кек характеризуется высокой зольностью (32,6 мас%) и влажностью (14,6 мас%). При этом теплота сгорания (22,1 МДж/кг) данного вида топлива сопоставима с различными типами бурых углей [19].

В качестве жидкофазного компонента ВУС использовали пирогенетическую жидкость (рисунки 2), полученную в процессе пиролиза различной биомассы. В качестве исходной биомассы были использованы сосновые опилки, солома, навоз, скорлупа кедрового ореха и отходы пивоваренного производства.

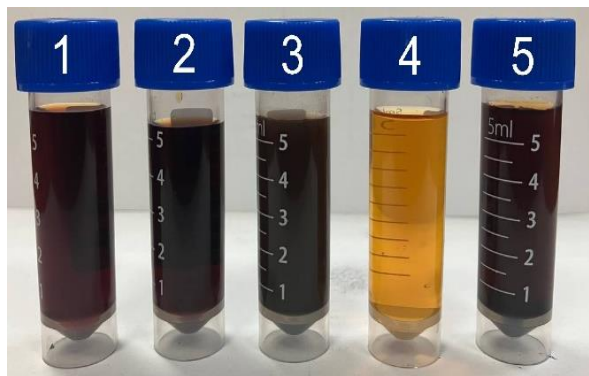


Рис.2. Внешний вид пирогенетической жидкости, 1 – опилки сосны, 2 – солома, 3 – навоз, 4 – кедровый орех, 5 – отходы пивного производства.

Пиролиз биомассы проводили с использованием лабораторного стенда, представленного в предыдущей работе [20]. Температура пиролиза (в реакторе) составляла 500 ± 20 оС. Нагрев образца биомассы осуществлялся при скорости 15 оС/мин. Продолжительность процесса пиролиза при заданной температуре составляла 1 час.

Далее для конденсируемых жидкофазных продуктов пиролиза осуществлялось отделение пирогенетической жидкости. Для этого была использована методика плотностной сепарации, более подробное описание которой приведено в работе [14]. Исходные образцы жидких углеводов пиролиза биомассы в объеме 50 мл центрифугировали 24 часа при 400 об/мин. Низкая частота вращения использована для исключения нагрева образца при столь длительном центрифугировании.

Полная замена технической воды в составе ВУС на пирогенетическую жидкость является не целесообразным ввиду резкого возрастания вязкости суспензии и ухудшения реологических характеристик топлива в целом. В связи с этим в качестве третьего (дополнительного) компонента ВУС была использована техническая вода. Исследуемые составы ВУС представлены в таблице 2.

Таблица 2. Типы и массовые соотношения исследуемых составов ВУС

Образец	Состав			Условное обозначение
	Фильтр-кек	Пирогенетическая жидкость	Вода	
Образец сравнения	50	0	50	O1
Опилки сосны	50	30	20	O2
Солома				O3
Навоз				O4
Кедровый орех				O5
Отходы пивного производства				O6

Определение значения теплоты сгорания проводилось согласно ГОСТ 147-2013. Исследуемые образцы ВУС предварительно выдерживались при 60 оС в сушильном шкафу до достижения постоянной массы. Данный подход был использован для определения теплоты сгорания остаточных углеводов, находящихся в пирогенетической жидкости.

На рисунке 3 представлен лабораторный стенд исследования процессов капельного зажигания жидких топлив.

В состав экспериментальной установки входит муфельная печь (Спутник, Россия), объем

камеры сгорания составляет 0,003 м³. Для определения времени задержки зажигания и визуализации процесса горения была использована высокоскоростная камера Fastcam Mini UX100 (Photron, Япония). Максимальное разрешение камеры при частоте 1000 к/с и 36-bit цвете составляет 1280x720 пикселей. Образец заводился в камеру сгорания с помощью автоматизированного координатного механизма.



Рис.3. Принципиальная схема лабораторного стенда капельного зажигания жидких топлив.

Время задержки зажигания и полного горения были использованы в качестве параметров оценки реакционной способности исследуемых составов топлива. Температура греющей среды T_g в камере сгорания составляла 800 °С.

Капля ВУС наносилась на металлический держатель с помощью дозатора Lenpipet NOVUS 10-100 мкл (одноканальный, точность $\pm 1,0$ мкл). Средний диаметр капли составляет 2 мм.

Результаты и обсуждения

Характеристики образцов водоугольной суспензии

В таблице 3 представлены значения низшей теплоты сгорания исследуемых образцов ВУС.

Таблица 3. Низшая теплота сгорания образцов ВУС

Образец ВУС	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
O1	18,7
O2	22,2
O3	21,7
O4	22,3
O5	22,5
O6	21,8

Из таблицы 3 видно, что низшая теплота сгорания образцов O2-O6 в сравнении с образ-

цом сравнения O1 (без использования пирогенетической жидкости) увеличилась от 3,0 до 3,8 МДж/кг. Увеличение значений низшей теплоты сгорания объясняется присутствием горючих жидких углеводородов C_xH_y в составе пирогенетической жидкости. Ранее нами было установлено [16], что состав пирогенетической жидкости характеризуется наличием кетонов, фенолов, ангидридов, эфиров, спиртов и т.д.

Задержка зажигания

В таблице 4 представлены вычисленные с помощью высокоскоростной видеосъемки значения времени задержки зажигания исследуемых образцов ВУС

Таблица 4. Время задержки зажигания исследуемых образцов ВУС

Образец	Время задержки зажигания t_i , с
O1	9,92 $\pm$ 0,33
O2	8,39 $\pm$ 0,38
O3	9,33 $\pm$ 0,27
O4	8,18 $\pm$ 0,34
O5	7,93 $\pm$ 0,37
O6	9,15 $\pm$ 0,32

Сокращение времени задержки зажигания относительно исходного образца изменилось от 5,9 до 20,0 отн%. Анализируя данные таблицы 4, можно построить следующую зависимость образцов по их реакционной способности (от большего к меньшему): O5>O4>O2>O6>O3>O1. При этом полученные значения параметра t_i находятся в хорошем согласии с данными теплоты сгорания (таблица 3).

Изменение реакционной способности связано с наличием легких углеводородов. Их присутствие в составе косвенно подтверждается появлением искроподобных частиц, что видно на рисунке 5 (образец O5).

На рисунке 5 представлены типичные кадры высокоскоростной видеосъемки, визуализирующие процессы капельного зажигания и последующего горения исследуемых образцов ВУС при температуре $T_g = 800$ °С.

Для образца сравнения (O1) процесс горения сопровождается образованием периодических импульсов с последующим нарушением формы видимого пламени (рисунок 5б). Вероятнее всего это связано с увеличением удельного объема пара при его перегреве, и последующем выходом с поверхности капли ВУС. В свою очередь образцы ВУС, выполненные на основе пирогенетической жидкости, характеризовались устойчивым процессом пламенного горения без нарушения формы видимого пламени. Также при вводе данных образцов в камеру сгорания, в

близки образца наблюдается образование дисперсных зажигающихся элементов, продолжительность горения которых в среднем составляла 0,1 с.

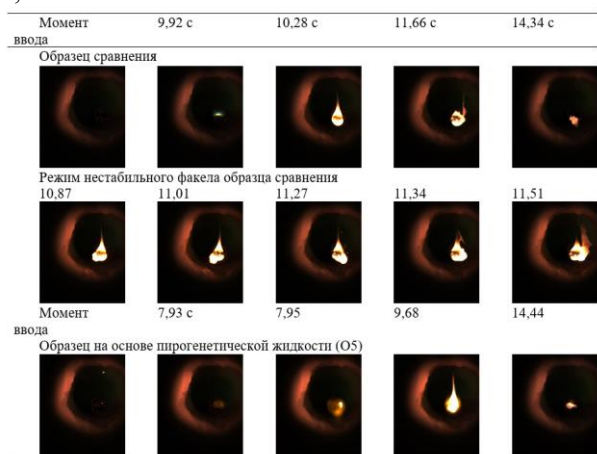


Рис. 5 Кадры высокоскоростной видеосъемки процессов зажигания и последующего горения капель ВУС

Материально-энергетический баланс

Количество теплоты необходимое для проведения пиролиза, можно представить в следующем виде:

$$Q_{\text{пир}} = Q_{\text{осуш}} + Q_{\text{лет}}, \text{ кДж} \quad (1)$$

$$Q_{\text{осуш}} = Q_{\text{исп}} + Q_{\text{связ}}, \text{ кДж} \quad (2)$$

$Q_{\text{осуш}}$ и $Q_{\text{лет}}$ количество теплоты затрачиваемое на осушку и удаление летучих соединений в процессе пиролиза.

$$Q_{\text{исп}} = m_{\text{исх}} \cdot w \cdot \left(r(100^\circ\text{C}) + \int_{T_i}^{100^\circ\text{C}} c_{\text{вода}} dT + \int_{100^\circ\text{C}}^{T_f} c_{\text{пар}} dT \right) \quad (3)$$

где: $m_{\text{исх}}$ – масса сырья (кг); w – влажность (%); r – теплота парообразования (кДж/кг); c – удельная теплоёмкость (кДж/(кг·°C)). Все расчеты проводились на 1 кг исходного сырья.

Для удаления химически связанной воды, необходимо нагреть до 160-190 оС [21]:

$$Q_{\text{связ}} = m_{\text{сух}} \int_{T_s}^{190^\circ\text{C}} c_{p_{\text{сух}}} dT, \text{ кДж} \quad (4)$$

где: $m_{\text{сух}}$ – масса высушенного топлива [кг]; $c_{p_{\text{сух}}}$ – изобарная теплоемкость сухого топлива [кДж/(кг·°C)].

Необходимое количество теплоты для удаления летучих соединений:

$$Q_{\text{лет}} = m_{\text{исх}} \cdot (1 - w) \cdot E_a + m_{\text{с.у.}} \cdot c_{p_{\text{с.у.}}} \cdot (T_{\text{пир}} - T_f) + m_{\text{м.ч.}} \cdot c_{p_{\text{м.ч.}}} \cdot (T_{\text{пир}} - T_f), \text{ кДж} \quad (5)$$

где: E_a – энергия активации процесса пиролиза [кДж/кг]; $m_{\text{у.о.}}$ – масса связанного углерода [кг]; $m_{\text{м.ч.}}$ – масса минеральной части [кг]; $T_{\text{пир}}$ –

температура пиролиза [K]; T_f – температура осушки [K]; $c_{p_{\text{с.у.}}}$ и $c_{p_{\text{м.ч.}}}$ – теплоемкость связанного углерода и минеральной части [кДж/(кг·°C)].

Таблица 5. Материально-энергетический баланс

Параметр	Значение
Данные усредненной биомассы	
Влажность W^a , масс. %	5,2
Зольность A^a , масс. %	0,4
Выход летучих V^a , масс. %	67,9
Связанный углерод C^a , масс. %	26,5
Материальный баланс	
Углеродный остаток $m_{\text{у.о.}}$, масс. %	0,30
Жидкие углеводороды $m_{\text{жу}}$, масс. %	0,55
Неконденсируемые газы $m_{\text{газ}}$, масс. %	0,15
Содержание пирогенетической жидкости в жидких углеводородах $X_{\text{пж}}$, %	0,8
Теплофизические характеристики	
Теплоемкость воды $c_{\text{вода}}$, кДж/(кг·°C)	4,22
Теплота парообразования r , кДж/кг	2260
Начальная температура T_i , °C	20
Температура начала осушки T_b , °C	150
Теплоемкость на стадии сушки $c_{\text{пар}}$, кДж/(кг·°C)	1,96
Температура окончания осушки T_s , °C	190
Теплоемкость высушенного материала $c_{p_{\text{сух}}}$, кДж/(кг·°C)	1,55
Энергия активации E_a , кДж/кг	2845
Теплоемкость связанного углерода $c_{p_{\text{с.у.}}}$, кДж/(кг·°C)	1,20
Теплоемкость инертной части $c_{p_{\text{м.ч.}}}$, кДж/(кг·°C)	0,75
Температура пиролиза $T_{\text{пир}}$, °C	500
Энергетический баланс	
Количество теплоты затрачиваемое на осушку материала $Q_{\text{осуш}}$, кДж/кг	329
Количество теплоты затрачиваемое на удаление летучих соединений $Q_{\text{лет}}$, кДж/кг	2808
Количество теплоты затрачиваемое на проведение пиролиза $Q_{\text{пир}}$, кДж/кг	3137

Исходя из полученных результатов, для проведения пиролиза необходимо 3137 кДж тепловой энергии на 1 кг биомассы. Из этого следует, теплота, получаемая в процессе сжигания ВУС на основе пирогенетической жидкости, может покрыть затраты на проведение процесса пиролиза. При этом профицит пирогенетической жидкости составляет порядка 69-70% в зависимости от биомассы. Оставшуюся ВУС на основе пирогенетической жидкости можно использовать на производство тепловой энергии.

Заключение

В работе было изучено горение ВУС, выполненного на основе пирогенетической жидкости, полученной из различной биомассы. Было

установлено, что пирогенетическая жидкость способствует повышению реакционной способности ВУС, что выражается в сокращении времени задержки зажигания на 5,9-20,0 отн%. Также теплота сгорания ВУС была увеличена с 3,0 до 3,8 МДж/кг в зависимости от типа биомассы. Также образцы ВУС выполненные на основе пирогенетической жидкости характеризовались отсутствием пульсаций пламенного горения, ввиду выхода образующегося перегретого пара с поверхности капли.

Таким образом, пирогенетическая жидкость являясь балластовым продуктом пиролиза, а фильтр-кек отходом, их применение в топливно-энергетическом комплексе является экономически и экологически целесообразным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2023-045/1 (FZES-2021-0008).

Список литературы

1. Energy - Worldwide [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://www.statista.com/outlook/io/energy/worldwide> (дата обращения: 24.10.2023).
2. IEA. Net Zero by 2050 // Net Zero by 2050. OECD, 2021.
3. Amjith L., Bavanish B. A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment // Chemosphere. 2022. – Vol. 293. – P. 133579.
4. Chen W.-H., Lin B.-J., Lin Y.-Y., Chu Y.-S., Ubando A.T., Show P.L., Ong H.C., Chang J.-S., Ho S.-H., Culaba A.B., Pétrissans A., Pétrissans M. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges // Prog. Energy Combust. Sci. 2021. – Vol. 82. – P. 100887.
5. Anerud E., Krigstin S., Routa J., Brännström H., Arshadi M., Helmele C., Bergström D., Egnell G. Dry matter losses during biomass storage Measures to minimize feedstock degradation // IEA Bioenergy. 2019.
6. Lewandowski W.M., Ryms M., Kosakowski W. Thermal Biomass Conversion: A Review // Processes. 2020. – Vol. 8 – № 5. – P. 516.
7. Luo Z., Zhou J. Thermal Conversion of Biomass // Handbook of Climate Change Mitigation. New York, NY: Springer US, 2012. – P. 1001–1042.
8. Hanif M.U., Capareda S.C., Iqbal H., Arazo R.O., Baig M.A. Effects of Pyrolysis Temperature on Product Yields and Energy Recovery from Co-Feeding of Cotton Gin Trash, Cow Manure, and Microalgae: A Simulation Study // PLoS One / ed. Vazquez-Duhalt R. 2016. – Vol. 11 – № 4. – P. e0152230.
9. Hoang Pham L.K., Vi Tran T.T., Kongparakul S., Reubroycharoen P., Ding M., Guan G., Vo D.-V.N., Jaiyong P., Youngvises N., Samart C. Data-driven prediction of biomass pyrolysis pathways toward phenolic and aromatic products // J. Environ. Chem. Eng. 2021. – Vol. 9 – № 2. – P. 104836.
10. Ashoor S., Khang T.U., Lee Y.H., Hyung J.S., Choi S.Y., Lim S.E., Lee J., Park S.J., Na J.-G. Bioupgading of the aqueous phase of pyrolysis oil from lignocellulosic biomass: a platform for renewable chemicals and fuels from the whole fraction of biomass // Bioresour. Bioprocess. 2023. – Vol. 10 – № 1. – P. 34.
11. Базренде Е.Н., Григорьева Л.С., Остроухов Н.Н. Экстракция суммарных водорастворимых алкилрезорцинов из подсмольной воды производства kiviter метилизобутилкетона // Химия твердого топлива. 2021. – № 3. – С. 48–57
12. Oasmaa A., Fonts I., Pelaez-Samaniego M.R., Garcia-Perez M.E., Garcia-Perez M. Pyrolysis Oil Multiphase Behavior and Phase Stability: A Review // Energy & Fuels. 2016. – Vol. 30 – № 8. – P. 6179–6200.
13. R. Chandraratne M., G. Daful A. Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass // Recent Perspectives in Pyrolysis Research. IntechOpen, 2022.
14. Borole A.P., Tsouris C., Pavlostathis S.G., Yiaccoumi S., Lewis A.J., Zeng X., Park L. Efficient Conversion of Aqueous-Waste-Carbon Compounds Into Electrons, Hydrogen, and Chemicals via Separations and Microbial Electrocatalysis // Front. Energy Res. 2018. – Vol. 6.
15. Kuznetsov G. V., Salomatov V. V., Syrodoi S. V. Effect of Diffusion of Coal Pyrolysis Products on the Ignition Characteristics and Conditions of Coal–Water Fuel Droplets // Combust. Explos. Shock Waves. 2018. – Vol. 54 – № 6. – P. 654–663.
16. Larionov K.B., Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Z., Ulko A.A., Gubin V.E. Energy recycling of pyrolysis water as a part of coal-water fuel // Int. J. Energy Res. 2021. – Vol. 45 – № 10. – P. 14895–14909.
17. Kaltaev A.Z., Slyusarskiy K. V., Kirgina M. V., Bogdanov I.A., Larionov K.B. Utilization of Different Fractions of Pyrolysis Water in Coal Water Fuel for Additional Heat Recovery // Waste and Biomass Valorization. 2023. – Vol. 14. – №. 3. – P. 989–1003
18. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Z. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // Energy. 2022. – Vol. 257. – P. 124813.
19. Küçükbayrak S., Haykırı-Açma H., Ersoy-Merçiboğlu A., Yaman S. Effect of lignite properties on reactivity of lignite // Energy Convers. Manag. 2001. – Vol. 42 – № 5. – P. 613–626.
20. Gorshkov A., Berezikov N., Kaltaev A., Yankovsky S., Slyusarsky K., Tabakaev R., Larionov K. Analysis of the Physicochemical Characteristics of Biochar Obtained by Slow Pyrolysis of Nut Shells in a Nitrogen Atmosphere // Energies. 2021. – Vol. 14 –

№ 23. – P. 8075.

21. Marculescu C. Comparative Analysis on Waste to Energy Conversion Chains Using Thermal-chemical Processes // *Energy Procedia*. 2012. – Vol. 18. – P. 604–611.

References

1. Energy - Worldwide [Electronic resource]. 2023. URL: <https://www.statista.com/outlook/io/energy/worldwide> (date accessed: 24.10.2023).
2. IEA. Net Zero by 2050 // Net Zero by 2050. OECD, 2021.
3. Amjith L., Bavanish B. A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment // *Chemosphere*. 2022. – Vol. 293. – P. 133579.
4. Chen W.-H., Lin B.-J., Lin Y.-Y., Chu Y.-S., Ubando A.T., Show P.L., Ong H.C., Chang J.-S., Ho S.-H., Culaba A.B., Pétrissans A., Pétrissans M. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2021. – Vol. 82. – P. 100887.
5. Anerud E., Krigstin S., Routa J., Brännström H., Arshadi M., Helmeste C., Bergström D., Egnell G. Dry matter losses during biomass storage Measures to minimize feedstock degradation // *IEA Bioenergy*. 2019.
6. Lewandowski W.M., Ryms M., Kosakowski W. Thermal Biomass Conversion: A Review // *Processes*. 2020. – Vol. 8 – № 5. – P. 516.
7. Luo Z., Zhou J. Thermal Conversion of Biomass // *Handbook of Climate Change Mitigation*. New York, NY: Springer US, 2012. – P. 1001–1042.
8. Hanif M.U., Capareda S.C., Iqbal H., Arazo R.O., Baig M.A. Effects of Pyrolysis Temperature on Product Yields and Energy Recovery from Co-Feeding of Cotton Gin Trash, Cow Manure, and Microalgae: A Simulation Study // *PLoS One* / ed. Vazquez-Duhalt R. 2016. – Vol. 11 – № 4. – P. e0152230.
9. Hoang Pham L.K., Vi Tran T.T., Kongparakul S., Reubroycharoen P., Ding M., Guan G., Vo D.-V.N., Jaiyong P., Youngvises N., Samart C. Data-driven prediction of biomass pyrolysis pathways toward phenolic and aromatic products // *J. Environ. Chem. Eng.* 2021. – Vol. 9 – № 2. – P. 104836.
10. Ashoor S., Khang T.U., Lee Y.H., Hyung J.S., Choi S.Y., Lim S.E., Lee J., Park S.J., Na J.-G. Bioupggrading of the aqueous phase of pyrolysis oil from lignocellulosic biomass: a platform for renewable chemicals and fuels from the whole fraction of biomass // *Bioresour. Bioprocess*. 2023. – Vol. 10 – № 1. – P. 34.
11. Baerends E.N., Grigor'eva L.S., Ostrouhov N.N. Extraction of total water-soluble alkylresorcinols from tar water produced by Kiviter with methyl isobutyl ketone // *Khimiya tverdogo topliva (Solid fuel Chemistry)* 2021. № 3. P. 48–57.
12. Oasmaa A., Fonts I., Pelaez-Samaniego M.R., Garcia-Perez M.E., Garcia-Perez M. Pyrolysis Oil Multiphase Behavior and Phase Stability: A Review // *Energy & Fuels*. 2016. – Vol. 30 – № 8. – P. 6179–6200.
13. R. Chandraratne M., G. Daful A. Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass // *Recent Perspectives in Pyrolysis Research*. IntechOpen, 2022.
14. Borole A.P., Tsouris C., Pavlostathis S.G., Yiaccoumi S., Lewis A.J., Zeng X., Park L. Efficient Conversion of Aqueous-Waste-Carbon Compounds Into Electrons, Hydrogen, and Chemicals via Separations and Microbial Electrocatalysis // *Front. Energy Res*. 2018. – Vol. 6.
15. Kuznetsov G. V., Salomatov V. V., Syrodoi S. V. Effect of Diffusion of Coal Pyrolysis Products on the Ignition Characteristics and Conditions of Coal–Water Fuel Droplets // *Combust. Explos. Shock Waves*. 2018. – Vol. 54 – № 6. – P. 654–663.
16. Larionov K.B., Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Z., Ulko A.A., Gubin V.E. Energy recycling of pyrolysis water as a part of coal-water fuel // *Int. J. Energy Res*. 2021. – Vol. 45 – № 10. – P. 14895–14909.
17. Kaltaev A.Z., Slyusarskiy K. V., Kirgina M. V., Bogdanov I.A., Larionov K.B. Utilization of Different Fractions of Pyrolysis Water in Coal Water Fuel for Additional Heat Recovery // *Waste and Biomass Valorization*. 2023. – Vol. 14. – № 3. – P. 989–1003.
18. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Z. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // *Energy*. 2022. – Vol. 257. – P. 124813.
19. Küçükbayrak S., Haykırı-Açma H., Ersoy-Merriçboyu A., Yaman S. Effect of lignite properties on reactivity of lignite // *Energy Convers. Manag.* 2001. – Vol. 42 – № 5. – P. 613–626.
20. Gorshkov A., Berezikov N., Kaltaev A., Yankovsky S., Slyusarsky K., Tabakaev R., Larionov K. Analysis of the Physicochemical Characteristics of Biochar Obtained by Slow Pyrolysis of Nut Shells in a Nitrogen Atmosphere // *Energies*. 2021. – Vol. 14 – № 23. – P. 8075.
21. Marculescu C. Comparative Analysis on Waste to Energy Conversion Chains Using Thermal-chemical Processes // *Energy Procedia*. 2012. – Vol. 18. – P. 604–611.

УДК 620.92

Установка «Плутон»

К.В. Муреева¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹ksesha_3169@mail.ru,

Статья поступила 16.11.2023 г.; после доработки 17.11.2023 г.

Аннотация

В статье рассматривается инновационный метод утилизации и переработки радиоактивных отходов при помощи «горячего» способа. Автор анализирует преимущества данного метода, а также их влияние на окружающую среду и экономику. В статье также рассматриваются новые технологии, которые могут улучшить эффективность и снизить затраты на утилизацию отходов.

Ключевые слова: Плазма, Твердые радиоактивные отходы, Плавление, Переработка, Инновации, Технологии, Экология, Энергетика.

"Pluton" technology

K.V. Mureeva¹

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹ksesha_3169@mail.ru

Received 16.11.2023 y.; received in final form 17.11.2023 y.

Abstract

The article discusses an innovative method of disposal and processing of radioactive waste using the "hot" method. The author analyzes the advantages of this method, as well as their impact on the environment and economy. The article also discusses new technologies that can improve efficiency and reduce waste disposal costs.

For citation: Plasma, Solid radioactive waste, Melting, Recycling, Innovation, Technology, Ecology, Energy.

Введение

Энергия играет неотъемлемую роль в современном мире, обеспечивая функционирование промышленности, транспорта и других аспектов нашей жизни. Однако в условиях растущего потребления и образованию все большего количества отходов, энергетический вопрос становится одним из основных для человечества. Изобретение инновационных способов утилизации и переработки отходов становится необходимым шагом для обеспечения энергетической безопасности, сокращения выбросов углекислого газа и повышения эффективности использования ресурсов.

В настоящее время человечество сталкивается с глобальными проблемами, связанными с

большим количеством накопленных радиоактивных отходов.

В данной статье мы рассмотрим наиболее перспективный инновационный метод, который может быть использован для утилизации радиоактивных отходов. Сосредоточившись на его преимуществах и возможностях применения. Мы сможем получить представление о будущем энергетическом ландшафте и о том, какие инновации помогут нам преодолеть проблемы, стоящие перед нами.

Виды средств утилизации РАО.

Прикладывая усилия для поддержания работоспособности атомных электростанций и других отраслей промышленности, а также для

борьбы с последствиями аварий и осуществления научных исследований, возникает значительное количество твёрдых и жидких радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности. Чтобы временно решить эту проблему, следует использовать модульные хранилища радиоактивных отходов. Однако, для окончательного разрешения этой проблемы необходимо разработать новые методы утилизации и изоляции радиоактивных отходов. Эффективным способом окончательной стабилизации радиоактивных отходов является высокотемпературная обработка с последующим получением химически, термически и радиационно стойких форм отходов в виде стекла или керамики. Высокие температуры (1500–2000 °С) обеспечивают глубокую переработку радиоактивных отходов и заметное сокращение их объема.

Плазменный метод

Плазменная технология позволяет эффективно перерабатывать смешанные отходы сложного состава с получением продукта, который не содержит органические материалы и не теряет свою химическую стойкость и механическую прочность в течение десятков и сотен лет.[1]

Установка «Плутон»

Основой установки является печь шахтного типа, состоящая из шахты и плавителя, узлов загрузки отходов и слива шлакового расплава. В своде плавильной камеры размещены два плазмотрона мощностью 100-150 кВт каждый, которые обеспечивают температуру расплава 1500-1700°С. В нижней торцевой части плавителя имеется сливное устройство, состоящее из сливного блока со сливным каналом, установленного горизонтально, и стопора, запирающего сливной канал в процессе разогрева плавителя и по окончании слива. Шахтная печь установки «Плутон» выполнена из огнеупорных и теплоизолирующих материалов с наружной облицовкой стальным листом.

Отходы с помощью конвейера через шиберные устройства узла загрузки попадают в верхние слои шахты, заполненной перерабатываемым материалом. Опускаясь под действием силы тяжести, перерабатываемый материал нагревается за счет тепла отходящих газов, движущихся навстречу движению столба материала в шахте печи. В верхних и средних слоях шахты отходы проходят стадии сушки за счет тепла от-

ходящих газов и пиролиза при отсутствии свободного кислорода, сопровождающиеся интенсивным газовыделением. Органические остатки отходов и тугоплавкие неорганические составляющие поступают в нижние слои шахты – зону горения коксового остатка и плавления шлака.

Шлаковый расплав накапливается в плавильной ванне, где он гомогенизируется, перегревается и через узел слива направляется в бокс приемки расплава. Шлак сливается в непрерывном или периодическом режиме в металлические контейнеры, устанавливаемые в приемном боксе. Температура шлакового расплава в ванне печи достигает 1600-1800°С, при этом температура отходящих газов на выходе шахтной печи не превышает 250–300°С. Такой градиент температур по высоте шахты достигается за счет поглощения тепла перегретых газов плавителя процессами пиролиза и сушки отходов, одновременно обеспечивается удержание наиболее летучих радиоактивных и химически токсичных компонентов (тяжелых металлов) в средних и верхних слоях отходов в шахтной печи.

Пиролизные газы из шахты печи направляются в камеру дожигания, где горючие газовые и аэрозольные компоненты пирогаза подвергаются глубокому окислению при температуре 1100–1300°С.

Далее отходящие газы охлаждаются, очищаются от аэрозолей в рукавном фильтре, и вредных газообразных компонентов (HCl, NO_x, SO₂) в скруббере, орошаемом циркулирующим по контуру щелочным раствором. Перед выбросом в атмосферу отходящие газы проходят дополнительную санитарную очистку в абсолютном фильтре.[2]

Достоинства плазменной установки

Существует ряд достоинств использования плазменной технологии утилизации твердых РАО:

- максимальная безопасность процесса переработки отходов;
- экономическую эффективность обращения с РАО;
- минимизация наличия обслуживающего персонала на наиболее опасных участках;
- повышение безопасности длительного хранения и захоронения кондиционированных форм отходов благодаря переводу радиоактивных отходов в форму стеклоподобного шлака;
- в результате термической переработки - зна-

чительное сокращение объема отходов, возможность наиболее эффективного использования хранилищ и площадок захоронения кондиционированных форм РАО;

- значительное сокращение затрат на содержание хранилищ: строительство, эксплуатацию, закрытие и последующий контроль состояния сооружений Полигона.

Заключение

Переработки твердых радиоактивных отходов АЭС при помощи плазменно-пиролитической технологии повысит экономическую эффективность обращения с РАО, имеющими разнообразную морфологию, благодаря экономии объема хранилищ отходов, уменьшения количества оборудования и операций кондиционирования. Данный метод обеспечивает безопасность окружающей среды при длительном хранении РАО.

Плазменно-пиролитическая технология может быть эффективно применена для переработки бытовых и медицинских отходов.

Установка «Плутон» позволяет решить проблему вновь образующихся эксплуатационных отходов и обеспечивает глубокую термическую переработку радиоактивных отходов, накопленных ранее и компактированных в металлических бочках, освобождая место для хранения ТРО.

Список литературы

1. Полканов М.А. Плазменно-пиролитическая переработка твердых РАО. 7 Российская конференция по радиохимии, 2012.
2. Горбунов В.А. Плазменно-пиролитическая переработка твердых отходов. [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые, графические данные (293 КБ). М., 2012. – Режим доступа: [konf3_doklad11.pdf](#) ([ecologcontrol.ru](#))
3. Фролов К.В. Машиностроение ядерной техники. - Москва, 2005, - 661 с.
4. Туманов Ю.Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 372 с.
5. Бернадинер М. Н., Шурыгин А. П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. — М.: Химия, 1990. — 304 с.

References

1. Polkanov M.A. Plasma-pyrolytic processing of solid waste. 7 Russian Conference on Radiochemistry, 2012.
2. Gorbunov V.A. Plasma-pyrolytic processing of solid waste. [Electronic resource] – Electron. text, graphic data (293 KB). Moscow, 2012. – Access

mode: [konf3_doklad11.pdf](#)

3. Frolov K.V. Mechanical engineering of nuclear technology. - Moscow, 2005, - 661 p.
4. Tumanov Yu.N. Plasma and high-frequency processes of obtaining and processing materials in the nuclear fuel cycle: present and future. - M.: FIZMATLIT, 2003. - 372 p.
5. Bernadiner M. N., Shurygin A. P. Fire processing and neutralization of industrial waste. — M.: Chemistry, 1990. — 304 p.

УДК 628.147.22

Защита от коррозии на АЭС

Л.Н. Пичугова

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, e-mail: luiz.pi4ugowa@yandex.ru

Статья поступила 01.11.2023 г.; после доработки 03.11.2023 г.

Аннотация

Предложены инновационные методы защиты металлов от коррозии в условиях воздействия агрессивной среды при высоких температурных нагрузках. Коррозия рассматривается как основная проблема на атомных реакторных установках, в которых коррозия происходит непрерывно по всей реакторной установке, и ей подвержены все узлы и агрегаты. Коррозию невозможно полностью устранить, но ее необходимо и возможно контролировать.

Ключевые слова: коррозия, коррозионностойкие сплавы, эрозионно-коррозионный износ, типы коррозий, защита от коррозии, ядерный реактор.

Corrosion protection at nuclear power plants

L.N. Pichugova

Sevastopol state University, Sevastopol, 299002 Russia e-mail: luiz.pi4ugowa@yandex.ru

Received 01.11.2023 y.; received in final form 03.11.2023 y.

Аннотация

Innovative methods have been proposed to protect metals from corrosion under conditions of exposure to an aggressive environment at high temperature loads. Corrosion is considered as the main problem in nuclear reactor installations, in which corrosion occurs continuously throughout the entire reactor installation, and all components and assemblies are susceptible to it. Corrosion cannot be completely eliminated, but it is necessary and possible to control.

Key words: corrosion, corrosion-resistant alloys, erosion-corrosion wear, types of corrosion, corrosion protection, nuclear reactor.

Введение

Эрозионно-коррозионный износ трубопроводов является одним из важнейших факторов старения оборудования на всех АЭС мира. В 1986 г. проявление этого процесса только в США было зафиксировано на 34 блоках АЭС и стало требовать целевых действий по его выявлению и предупреждению [1].

Теплоэнергетическое оборудование выполняют из различных конструкционных материалов. Участки основного и теплофикационного циклов, а также системы охлаждения различаются не только конструкционными материалами, но и температурой, давлением и составом

примесей пара и воды.

Вместе с тем каждый из участков характеризуется довольно устойчивыми параметрами и качеством рабочей среды. Соответственно этим обстоятельствам при всем разнообразии видов коррозии на отдельных участках пароводяного тракта преобладают те или иные виды коррозии. Меры борьбы, естественно, направляются в первую очередь против преобладающего вида коррозии. Часто решающим фактором при выборе конструкционного материала для того или иного участка пароводяного тракта ТЭС является коррозионная стойкость металла в данной рабочей среде.

При облучении резко снижается коррозион-

ная стойкость металлов и сплавов [2]. Вода и водяной пар являются теплоносителями в водном и водно-паровом трактах АЭС. Вследствие радиолиза меняется состав электролита -- происходит разрушение молекул воды с образованием ионов и атомов кислорода, водорода и щелочной гидроксильной группы --ОН. Конструкционные реакторные материалы, подвергающиеся облучению, работают в контакте с водой и паром. Образующийся кислород окисляет металл, а водород его наводороживает и тем самым повышает хрупкость. Радиолиз воды и увеличение концентрации гидроксильных групп способствует растворению поверхностных оксидных пленок, в обычных условиях защищающих металл от коррозии. Скорость коррозии сплавов на основе алюминия в водной среде в условиях облучения возрастает в 2-3 раза.

Аустенитные хромоникелевые стали во влажном паре подвержены межкристаллической коррозии и коррозионному растрескиванию. Помимо изменения механических свойств (упрочнению и снижению пластичности) и вакансионного набухания, радиационное повреждение сталей приводит к появлению новых эффектов: радиационной ползучести, высоко- и низкотемпературному радиационному охрупчиванию (ВТРО и НТРО).

Коррозия является основной проблемой на атомных реакторных установках. Коррозия происходит непрерывно по всей реакторной установке, и ей подвержен каждый металл. Хотя эту коррозию невозможно устранить, ее можно контролировать.

Постановка цели задачи исследования

Коррозия - это разрушение материала из-за химического взаимодействия с окружающей средой. Это естественный процесс, при котором металлы преобразуют свою структуру в более химически стабильную форму, например, в оксиды, гидроксиды или сульфиды.

Последствия коррозии широко распространены. Знакомые примеры включают ржавчину панелей кузова автомобиля, трубопроводов и многих инструментов.

Коррозия является негативным явлением, поскольку связана с механическим разрушением объекта. Атомы металла удаляются из элемента конструкции до тех пор, пока он не выйдет из строя, или оксиды накапливаются внутри трубы, пока она не засорится. Все металлы и сплавы

подвержены коррозии, и даже благородные металлы, такие как золото, в некоторых средах подвержены коррозионному воздействию.

Для эффективного контроля за процессом коррозии необходимо иметь четкое представление о происходящих при этом физико-химических процессах и способах защиты от разрушения конструкционного материала или контроля за его состоянием. Это основная задача исследований.

Результаты научного исследования

Коррозия. Большинство металлов в металлической форме термодинамически не стабильны; они стремятся вернуться к более стабильным формам, обычно встречающимся в рудах, таким как оксиды [3].

Коррозия носит электрохимический характер, поскольку коррозионные химические реакции включают перенос заряда. Химия коррозии довольно сложна, но по существу ее можно рассматривать как электрохимическое явление. Ионы металла переходят в раствор, в результате чего металл становится отрицательно заряженным по отношению к электролиту. Разница в заряде вызывает появление потенциала и создает напряжение между электролитом и металлом [4].

Коррозия, как естественный и постоянный процесс, также приводит к непреднамеренному разрушению металлов, иногда с катастрофическими последствиями. Насколько серьезна проблема коррозии? Проблема коррозии металлов имеет важное значение. С экономической точки зрения было подсчитано, что около 5% доходов промышленно развитых стран тратится на предотвращение коррозии, а также на техническое обслуживание или замену продуктов, утраченных или загрязненных в результате коррозионных реакций.

В ядерной технике используется технический термин CRUD, обозначающий продукты коррозии и износа (частицы ржавчины и т. д.) в теплоносителе, которые становятся радиоактивными под воздействием радиации [5]. Этот термин является аббревиатурой от «Неопознанные отложения Чок-Ривер», первоначально обнаруженного на оболочке или внешнем покрытии топливных стержней канадского реактора, в честь которого он был назван. CRUD можно определить как отложившиеся или взвешенные циркулирующие продукты коррозии, в основном оксиды металлов, образующиеся в результате реакции воды с материалами трубопроводов. По

данным Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), CRUD, образующийся на электростанциях, является основным источником радиационного облучения операторов.

Формы коррозии. Области, где происходят анодные и катодные реакции, могут сильно различаться во время коррозии металла. Коррозия может проявляться в разных формах и развиваться с разной скоростью. Это приводит к различным формам коррозии, таким как равномерная коррозия, точечная и щелевая коррозия. Проблема в том, что существует множество форм коррозии, каждая из которых вызвана разными причинами и действует по-разному. Более того, каждая форма коррозии имеет свой особый механизм, который в некоторых случаях может быть весьма сложным. Это особенно проблематично, когда одновременно возникают два или более типа коррозии [6].

В основном, типы коррозий, разделяют на две подкатегории: общую (равномерную) и локализованную форму коррозии.

1. **Общая коррозия.** Общая коррозия, также известная как равномерная коррозия, представляет собой форму коррозии, которая затрагивает всю поверхность металла, тогда как другие формы затрагивают определенное место или часть. Этот тип коррозии обычно наблюдается в чистых металлах, которые металлургически однородны и однородны по составу. Это очень медленная реакция, которая достаточно равномерно распределяется по всей поверхности металла, подвергающейся воздействию циркулирующей воды. Она поражает довольно большую площадь металла, поэтому ее гораздо легче обнаружить и, следовательно, она менее серьезна, чем локальная коррозия. Проблема общей коррозии заключается в том, что она приводит к образованию большого объема оксидов, которые имеют тенденцию прикрепляться к поверхностям теплопередачи и влиять на эффективность системы [6].
2. **Локальная коррозия.** При локализованной коррозии происходит интенсивное воздействие на локализованные участки поверхности компонента, в то время как остальная часть поверхности подвергается коррозии с гораздо меньшей скоростью. Локализованная коррозия возникает, когда коррозия сочетается с другими разрушительными процессами, такими как напряжение, усталость, эрозия и другие формы химического воздействия [6].

Общая коррозия. Общая коррозия, также известная как равномерная коррозия, представляет собой форму коррозии, которая затрагивает всю поверхность металла, тогда как другие формы затрагивают определенное место или часть. Это наиболее распространенная форма коррозии. Этот тип коррозии обычно наблюдается в чистых металлах, которые металлургически однородны и однородны по составу. Атмосферостойкие стали, магниевые сплавы, цинковые сплавы и медные сплавы — это материалы, обычно подверженные общей коррозии. Пассивные материалы, такие как нержавеющая сталь, алюминиевые или никель-хромовые сплавы, обычно подвержены локальной коррозии.

Это очень медленная реакция, которая достаточно равномерно распределяется по всей поверхности металла, подвергающейся воздействию циркулирующей воды. Она поражает довольно большую площадь металла, поэтому ее гораздо легче обнаружить и, следовательно, она менее серьезна, чем локальная коррозия. Проблема общей коррозии заключается в том, что она приводит к образованию большого объема оксидов, которые имеют тенденцию прикрепляться к поверхностям теплопередачи и влиять на эффективность системы.

Общая коррозия – защита. Некоторые стандартные методы, связанные с выбором материала, защищающего от общей коррозии, включают:

- Использование устойчивых к коррозии материалов, таких как нержавеющая сталь и сплавы никеля, хрома и молибдена.
- Использование защитных покрытий, таких как краски и эпоксидные смолы.
- Нанесение на поверхность металлических и неметаллических покрытий или прокладок защищает от коррозии. Тем не менее, это позволяет материалу сохранять свою структурную прочность (например, сосуд под давлением из углеродистой стали с облицовкой из нержавеющей стали в качестве лайнера).

Локальная коррозия. При локализованной коррозии происходит интенсивное воздействие на локализованные участки поверхности компонента, в то время как остальная часть поверхности подвергается коррозии с гораздо меньшей скоростью. Локализованная коррозия возникает, когда коррозия сочетается с другими разрушительными процессами, такими как напряжение, усталость, эрозия и другие формы химического

воздействия.

Механизмы локализованной коррозии могут нанести больший ущерб, чем любой из этих разрушительных процессов по отдельности. Локальную коррозию можно далее классифицировать как точечную коррозию, гальваническую коррозию, щелевую коррозию, избирательную коррозию, эрозионную коррозию, межкристаллитную коррозию, хлоридную коррозию под напряжением и коррозионное растрескивание под напряжением (SCC). Пассивные материалы, такие как нержавеющая сталь, алюминиевые или никель-хромовые сплавы, обычно подвержены локальной коррозии.

Точечная коррозия. Точечная коррозия характеризуется резко очерченными очагами, является одной из самых коварных форм коррозии. Обычно они проникают сверху горизонтальной поверхности вниз в почти вертикальном направлении, и предполагается, что сила тяжести заставляет ямки расти вниз.

Точечная коррозия может привести к разрушению из-за перфорации, вызывая при этом лишь небольшую потерю веса металла. Эту перфорацию бывает трудно обнаружить, а ее рост происходит быстро, что приводит к неожиданной потере функции компонента. Точечная коррозия также связана как с щелевой, так и с гальванической коррозией. Отложение металла (ионы меди, нанесенные на стальную поверхность) также может создавать места для точечной коррозии.

К причинам Точечной коррозии относятся:

- Локальные неоднородности на поверхности металла
- Локальная потеря пассивности
- Механическое или химическое разрушение защитного оксидного покрытия
- Гальваническая коррозия от относительно удаленного катода

В коррозионностойких сплавах, таких как нержавеющая сталь, наиболее распространенной причиной точечной коррозии является локальное разрушение пассивности при контакте с влагой, содержащей ионы галогенидов, особенно хлориды. Однако легирование примерно 2% молибдена значительно повышает их стойкость. Точечная коррозия нержавеющей стали, вызванная хлоридами, обычно приводит к подрезанию, образующему увеличенные подповерхностные полости или каверны.

Точечная коррозия – защита. Точечная коррозия представляет собой опасность из-за возможного быстрого проникновения в металл с не-

большой общей потерей массы. Точечную коррозию можно свести к минимуму за счет:

- Поддержание чистоты;
- Использование правильных металлов и сплавов, которые менее подвержены коррозии.
- Избегание присутствия в среде веществ, вызывающих точечную коррозию
- Проектирование системы и компонентов таким образом, чтобы не было щелей.

Щелевая коррозия. Щелевая коррозия – это локальная коррозия в щели или зазоре между двумя или более соединяемыми металлами. Щелевая коррозия — это тип точечной коррозии, которая возникает особенно в зоне щели с низким потоком. Этот тип разрушения обычно связан с небольшими объемами застойного раствора, образующегося в отверстиях, на поверхности прокладок, внахлесточных соединениях, поверхностных отложениях и щелях под головками болтов и заклепок. Повреждение происходит из-за разницы в концентрации компонентов, главным образом кислорода, на вовлеченных поверхностях. Щелевая коррозия может прогрессировать быстро (в десятки и сотни раз быстрее, чем нормальная скорость общей коррозии в том же растворе).

Щелевая коррозия представляет опасность из-за возможного быстрого проникновения в металл с небольшой общей потерей массы. Щелевая коррозия сводится к минимуму за счет:

- Щелевую коррозию можно предотвратить, используя сварные соединения вместо заклепочных или болтовых.
- Использование правильных металлов и сплавов, которые менее подвержены коррозии.
- Избегание присутствия в среде веществ, вызывающих точечную коррозию
- Проектирование системы и компонентов таким образом, чтобы не было щелей.

Гальваническая коррозия. Гальваническая коррозия возникает, когда два разнородных металла погружены в проводящий раствор при наличии некоторой разности потенциалов и между металлами происходит поток электронов. Это может произойти и с одним металлом, имеющим неоднородности (несходства) (например, примесные включения, зерна разного размера, различия в составе зерен или различия в механических напряжениях). Металл с меньшей коррозионной стойкостью становится анодом, а металл с большей коррозионной стойкостью стано-

вится катодом. Коррозия менее коррозионно-стойких материалов обычно увеличивается, а воздействие на более стойкие материалы снижается. Разница в электрическом потенциале существует между различными металлами и служит движущей силой для протекания электрического тока через корродант или электролит.

Гальваническая коррозия возникает только при выполнении следующих условий:

- Должны присутствовать два разных металла
- Два металла должны находиться в контакте, или между ними должен присутствовать электропроводящий путь.
- Должен существовать электропроводящий путь, по которому ионы могут перемещаться от «анода» к «катоде».
- Если какое-либо из этих условий не соблюдено, гальваническая коррозия вряд ли произойдет.

Гальваническая коррозия вызывает разрушение только одного из металлов. Более сильный, благородный – катодный (положительный) и защищенный. Таков механизм действия гальванических анодов, которые являются основным компонентом системы гальванико-катодной защиты (КЗ), используемой для защиты заглубленных или погруженных в воду металлических конструкций от коррозии. В некоторых случаях может помочь гальваническая коррозия.

Селективное выщелачивание – Селективная коррозия. Селективное выщелачивание или селективная коррозия удаляет один элемент из твердого сплава в процессе коррозии.

Наиболее распространенным примером является обесцинкование латуни, при котором цинк избирательно выщелачивается из медно-цинкового латунного сплава, в результате чего образуется ослабленная пористая структура меди. Селективное удаление цинка может осуществляться равномерным образом или в локальном масштабе.

Однако многие сплавы при определенных условиях подвергаются селективному выщелачиванию. Аналогичный процесс происходит и в других системах сплавов, из которых удаляются алюминий, железо, кобальт, хром и другие элементы.

Элементы в сплаве, более устойчивые к окружающей среде, остаются позади. Задействованы два механизма:

- Два металла в сплаве растворяются; один металл переоткладывается на поверхности уцелевших элементов.
- Один металл выборочно растворяется,

оставляя другие металлы.

Первая система предполагает обесцинкование латуней, вторая – удаление молибдена из никелевых сплавов в расплавленном гидроксиде натрия.

Эрозионная Коррозия. Эрозионная коррозия — это совокупное повреждение, вызванное электрохимическими коррозионными реакциями и механическими эффектами относительного движения между электролитом и корродирующей поверхностью. Эрозия может сопровождаться и другими формами деградации, например коррозией, которую называют эрозионно-коррозионной. Эрозионная коррозия – это процесс деградации материала, обусловленный совместным воздействием коррозии и износа. Почти все текущие или турбулентные агрессивные среды могут вызывать эрозионную коррозию. Механизм можно описать следующим образом:

- Механическая эрозия материала или защитный (или пассивный) оксидный слой на его поверхности.
- Усиливает коррозию материала, если скорость коррозии материала зависит от толщины оксидного слоя.

Эрозионная коррозия встречается в таких системах, как трубопроводы, клапаны, насосы, сопла, теплообменники и турбины. Износ – это процесс механического разрушения материала, происходящий на трущихся или ударяющихся поверхностях, тогда как коррозия включает химические или электрохимические реакции материала. Коррозия может ускорить износ, а износ может ускорить коррозию.

Межкристаллитная коррозия – распад сварного шва. Межкристаллитная коррозия – это преимущественная коррозия по границам зерен материала. Для некоторых сплавов и в особых условиях. Этот тип коррозии особенно распространен в некоторых нержавеющих сталях. В нержавеющей стали межкристаллитная коррозия может возникать из-за выделения карбидов хрома (Cr_{23}C_6) или интерметаллических фаз.

Устойчивость этих металлических сплавов к химическому воздействию агрессивных агентов основана на пассивации. Чтобы пассивация произошла и оставалась стабильной, сплав Fe-Cr должен иметь минимальное содержание хрома около 10,5% по массе, выше которого может возникнуть пассивация, а ниже невозможно. Но карбиды хрома могут осаждаться на границах зерен, что приводит к обеднению хромом в зонах, близких к границам зерен, из-за медленной скорости диффузии хрома. Обедненные хромом зоны становятся менее коррозионностойкими, чем

остальная часть матрицы. Обедненные участки могут активироваться в агрессивной среде, и коррозия будет возникать на узких участках между зернами.

Межкристаллитная коррозия является особенно серьезной проблемой при сварке нержавеющей стали. Это часто называют распадом сварного шва. Кроме того, сенсбилизируется нержавеющая сталь, подвергнутая термической обработке с образованием выделений на границах зерен и прилегающих зон, обедненных хромом. Нержавеющие стали можно стабилизировать против такого поведения путем добавления титана, ниобия или тантала, которые образуют карбид титана, карбид ниобия и карбид тантала предпочтительно, а не карбид хрома, путем снижения содержания углерода в стали, а также в случае сварки. присадочного металла менее 0,02%, либо нагрев всей детали выше 1000 °С и закалку ее в воде, приводящую к растворению карбида хрома в зернах и предотвращающую затем его осаждение[7].

Существуют два особых случая межкристаллитной коррозии, но эти механизмы рассматриваются отдельно:

- Коррозионное растрескивание под напряжением. Межкристаллитная коррозия, вызванная воздействием окружающей среды, называется коррозионным растрескиванием под напряжением.
- Хлоридное коррозионное растрескивание под напряжением. Межкристаллитная коррозия, вызванная совместным действием напряжений окружающей среды и хлора, называется хлоридным коррозионным растрескиванием под напряжением.

Коррозионное растрескивание под напряжением SCC. Одной из наиболее серьезных металлургических проблем и серьезной проблемой в атомной промышленности является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Коррозионное растрескивание под напряжением возникает в результате совместного действия приложенного растягивающего напряжения и агрессивной среды.

Оба влияния необходимы. SCC — это тип межкристаллитной коррозии, которая возникает на границах зерен под действием растягивающего напряжения. Он имеет тенденцию распространяться, поскольку напряжение открывает трещины, подверженные коррозии, которая затем подвергается дальнейшей коррозии, ослабляя металл из-за дальнейшего растрескивания. Трещины могут идти по межзеренному или транскристаллитному пути, часто наблюдается

тенденция к разветвлению трещин.

Поведение при разрушении характерно для этого хрупкого материала, хотя металлический сплав по своей природе пластичен. SCC может привести к неожиданному внезапному разрушению обычно пластичных металлических сплавов, подвергающихся растягивающим напряжениям, особенно при повышенных температурах. SCC обладает высокой химической специфичностью: некоторые сплавы могут подвергаться SCC только при воздействии небольшого количества химических сред.

Наиболее эффективными средствами предотвращения КРН в реакторных системах являются:

- правильно проектировать
- снижение стресса
- удаление критически важных веществ из окружающей среды, таких как гидроксиды, хлориды и кислород.
- избегать застойных зон и щелей в теплообменниках, где могут концентрироваться хлориды и гидроксиды.

Хлоридное коррозионное растрескивание под напряжением. Хлоридная коррозия под напряжением возникает в аустенитных нержавеющих сталях под действием растягивающих напряжений в присутствии кислорода, ионов хлорида и высокой температуры. Это одна из наиболее важных форм коррозии под напряжением, которая касается атомной промышленности. Аустенитные нержавеющие стали содержат от 16 до 25% Cr, а также могут содержать азот в растворе, что способствует их относительно высокой равномерной коррозионной стойкости. Одним из типов коррозии, которая может воздействовать на аустенитную нержавеющую сталь, является хлоридная коррозия под напряжением.

Для возникновения хлоридной коррозии под напряжением должны присутствовать три условия:

- Хлорид-ионы присутствуют в окружающей среде.
- Растворенный кислород присутствует в окружающей среде.
- Металл находится под растягивающим напряжением

Хлоридная коррозия под напряжением включает избирательное воздействие на металл по границам зерен.

Устойчивость этих металлических сплавов к химическому воздействию агрессивных агентов основана на пассивации. Чтобы пассивация

произошла и оставалась стабильной, сплав Fe-Cr должен иметь минимальное содержание хрома около 10,5% по массе, выше которого может возникнуть пассивация, а ниже невозможно. Но карбиды хрома могут осаждаться на границах зерен, что приводит к обеднению хромом в зонах, близких к границам зерен, из-за медленной скорости диффузии хрома. Обедненные хромом зоны становятся менее коррозионностойкими, чем остальная часть матрицы. Обедненные участки могут активироваться в агрессивной среде, и коррозия будет возникать на узких участках между зернами.

Было обнаружено, что это тесно связано с определенными термическими обработками, возникающими в результате сварки. Это можно значительно свести к минимуму с помощью правильных процессов отжига. Эту форму коррозии можно контролировать путем поддержания низкого содержания хлорид-ионов и кислорода в окружающей среде и использования низкоуглеродистых сталей. Ферритные нержавеющие стали выбираются из-за их устойчивости к коррозионному растрескиванию под напряжением, что делает их привлекательной альтернативой аустенитным нержавеющим сталям в тех случаях, когда преобладает хлорид-индуцированный SCC.

Защита от коррозии. Как было написано, проблема коррозии металлов является существенной. С экономической точки зрения было подсчитано, что около 5% доходов промышленно развитых стран тратится на предотвращение коррозии, а также на техническое обслуживание или замену продуктов, утраченных или загрязненных в результате коррозионных реакций. Таким образом, различные обработки замедляют коррозионное повреждение металлических предметов, подвергающихся воздействию погодных условий, соленой воды, кислот или других агрессивных сред. Поскольку существует множество форм коррозии, существует множество способов остановить или смягчить коррозию. В каждом случае это зависит от защищаемого материала и окружающей среды, в которой этот материал используется. Металлы можно защитить от коррозии, используя металл в среде, в которой он невосприимчив, создавая физический барьер между металлом и окружающей средой, используя электрический ток или изменяя окружающую среду:

- Выбор материала. Вероятно, наиболее распространенным и простым способом предотвращения коррозии является разумный выбор материалов после определения

характеристик коррозионной среды. Некоторые черные и многие цветные металлы и сплавы широко используются в агрессивных средах. Во всех случаях это сильно зависит от определенных сред и других условий. Здесь стоимость может быть существенным фактором. Не всегда экономически целесообразно использовать материал, обеспечивающий оптимальную коррозионную стойкость.

- Анतिकоррозионная обработка поверхности. Покрытие защищает, образуя физический барьер между металлической подложкой и водной коррозионной средой. Покрытия защищают металлические конструкции от коррозии за счет ингибирующего и барьерного эффектов. Барьерный эффект зависит от адгезии к нижнему слою, а также от непроводящих свойств покрытия. Проникновение воды или ионов является основной причиной потери барьера, что может привести к отслоению покрытия и коррозии под пленкой. Гальваническое покрытие, покраска и нанесение эмали являются наиболее распространенными антикоррозионными обработками.
- Анодирование. Анодирование — это процесс электролитической пассивации, используемый для увеличения толщины слоя естественного оксида на поверхности металлических деталей. Ограниченное количество металлов, таких как нержавеющая сталь, может достичь пассивности. Этот процесс называется анодированием, потому что обрабатываемая деталь образует анодный электрод электролизера. Алюминиевые сплавы обычно анодируют для повышения коррозионной стойкости и возможности окрашивания (окрашивания).
- Катодная защита. Катодная защита — это очень эффективный способ защиты от коррозии, основанный на использовании более анодного материала, чем защищаемый металл. Защищенный металл электрически связан с другим, более активным металлом в конкретной среде. Металл с меньшей коррозионной стойкостью становится анодом, а металл с большей коррозионной стойкостью становится катодом. Коррозия менее коррозионностойких материалов обычно увеличивается, а воздействие на более стойкие материалы снижается. Разница в электрическом потенциале существует между различными металлами и служит движущей силой для протекания электрического тока через

корродант или электролит. Системы катодной защиты, такие как стальные трубопроводы и резервуары, чаще всего используются для защиты подземных или погруженных в воду металлических конструкций от коррозии. Сплавы магния, цинка и алюминия являются распространенными жертвенными анодами. Магниевого аноды чаще всего используются в подземных грунтах. Цинк чаще всего используется в пресной и морской воде. Алюминиевые сплавы чаще всего используются для морских сооружений.

- Ингибиторы коррозии. Если окружающая среда контролируется (особенно в рециркуляционных системах), часто можно добавлять ингибиторы коррозии. Эти химикаты образуют электроизоляционное или химически непроницаемое покрытие на открытых металлических поверхностях для подавления электрохимических реакций. Ингибиторы коррозии – это химические вещества, которые при добавлении в окружающую среду в относительно низких концентрациях снижают скорость коррозионного процесса. Какое вещество действует как ингибитор, зависит от агрессивной среды и сплава. Ингибиторы обычно используются в закрытых системах, таких как автомобильные радиаторы и паровые котлы. Примером этого принципа является использование антифриза в автомобилях. Эффективность ингибитора зависит от нескольких различных механизмов. Некоторые реагируют с химически активными веществами в растворе, а другие реагируют с корродирующей поверхностью, препятствуя коррозионной реакции или образуя тонкий защитный слой. Например, восстановительные ингибиторы, такие как амины и гидразины, обычно удаляют кислород. В этом примере гидразин превращает кислород, распространенный коррозионный агент, в воду, которая обычно безвредна. Многие ингибиторы также токсичны и поэтому непригодны для всех применений. Еще одним ограничением ингибиторов является то, что они обычно теряют эффективность при повышении температуры и концентрации окружающей среды [8].

Заключение

Проблема коррозии металлов является существенной. С экономической точки зрения

было подсчитано, что более 5% доходов промышленности тратится на предотвращение коррозии, а также на техническое обслуживание или замену продуктов, утраченных или загрязненных в результате коррозионных реакций.

При проектировании и изготовлении узлов и агрегатов ядерных силовых установок необходимо использовать коррозионностойкие сплавы, пригодные для использования в агрессивных средах.

Исследования показали, что подбор материалов и сплавов, а также их сочетание зависит от определенных сред и других условий, таких как, например, как облучение, при котором резко снижается коррозионная стойкость металлов и сплавов.

Коррозионностойкие сплавы подразделяются на две основных группы: ферросплавы и сплавы цветных металлов.

В первом случае речь идет, прежде всего, о нержавеющей стали и в некоторой степени о чугунах. Эти материалы обладают высокой стойкостью к коррозии при работе в агрессивных средах и при этом достаточно прочны для изготовления узлов и агрегатов, работающих при большом давлении и высоких температурах.

В некоторых случаях предпочтение отдается сплавам цветных металлов, обладающими специфическими антикоррозионными свойствами, позволяющими их использовать в особо агрессивных средах, но обладающими низкими прочностными и температурными характеристиками.

Как показали исследования, большинство металлов в металлической форме термодинамически не стабильны; они стремятся вернуться к более стабильным формам, обычно встречающимся в рудах, таким как оксиды.

В ядерной технике используется технический термин CRUD, обозначающий продукты коррозии и износа (частицы ржавчины и т. д.) в теплоносителе, которые становятся радиоактивными под воздействием радиации.

Этот термин является аббревиатурой от «Неопознанные отложения Чок-Ривер», первоначально обнаруженного на оболочке или внешнем покрытии топливных стержней канадского реактора, в честь которого он был назван. CRUD можно определить как отложившиеся или взвешенные циркулирующие продукты коррозии, в основном оксиды металлов, образующиеся в результате реакции воды с материалами трубопроводов. По данным Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), CRUD, обра-

зующийся на электростанциях, является основным источником радиационного облучения операторов.

Электростанция должна быть спроектирована таким образом, чтобы свести к минимуму коррозию и отложения. Проект должен включать возможность эффективного удаления продуктов коррозии, систему очистки, оборудование для минимизации отложений нагара, а также выбор химического состава охлаждающей жидкости для уменьшения коррозии [9].

Коррозия является основной проблемой на атомных реакторных установках. Коррозия происходит непрерывно по всей реакторной установке, и ей подвержен каждый металл. Хотя эту коррозию невозможно устранить, ее можно контролировать.

Список литературы

1. Баничук, В. А. Современные требования к безопасности на АЭС / В. А. Баничук, О. Г. Любская // Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности (ИНТЕКС-2019) : Сборник материалов Международной научной студенческой конференции, Москва, 16 апреля 2019 года. Том Часть 3. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2019. – С. 164-166. – EDN YUITOV..
2. Виноградов, В. Н. Влияние облучения на коррозию нержавеющей стали / В. Н. Виноградов // Итоговая научно-техническая конференция : ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ ИТОГОВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Иваново, 01 января – 31 1976 года / Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР, Ивановский энергетический институт имени В.И. Ленина, Ивановское областное правление НТО Э и ЭП. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 1976. – С. 26. – EDN PHEHAN.
3. Болдырева, О. Н. Коррозия металлов и сплавов и основные методы защиты от коррозии : учебное пособие / О. Н. Болдырева, А. В. Звягинцева ; О. Н. Болдырева, А. В. Звягинцева ; ГОУВПО "Воронежский гос. технический ун-т". – Воронеж : Воронежский гос. технический ун-т, 2009. – 190 с. – EDN QNCLNJ.
4. Шелухина, Ю. М. Электрохимическая коррозия металлов / Ю. М. Шелухина. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2022. – 64 с. – ISBN 978-5-9948-4305-5. – EDN TBSPNH.
5. Григоров, В. В. Очистка жидких сред от нерастворенных радиоактивных примесей с помощью фильтрующих элементов с наноструктурными

мембранами : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Григоров Виталий Владимирович. – Москва, 2018. – 167 с. – EDN ZAVHFR.

6. Коррозия и защита металлических конструкций и оборудования / И. М. Жарский, Н. П. Иванова, Д. В. Куис, Н. А. Свидинович. – Минск : Вышэйшая школа, 2012. – 303 с. – ISBN 978-985-06-2029-3. – EDN YMNUFJ.
7. Чернов, И. И. Межкристаллитная коррозия реакторных конструкционных материалов / И. И. Чернов, М. С. Стальцов, Б. А. Калинин. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2021. – 36 с. – ISBN 978-5-7262-2738-2. – EDN JQKDAI.
8. Наумов, С. В. Материаловедение. Защита от коррозии : Учебно-методическое пособие / С. В. Наумов, А. Я. Самуилов. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2012. – 84 с. – ISBN 978-5-7882-1280-7. – EDN YSKHSH.
9. Королев, В. И. Обеспечение надёжности ядерных реакторов плавучих объектов при проектировании и эксплуатации / В. И. Королев, А. Ю. Ластовцев. – Санкт-Петербург : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2017. – 204 с. – ISBN 978-5-9509-0259-8. – EDN YVFJNL.

References

1. Banichuk, V. A., Kosygin V. N. Modern requirements for safety at nuclear power plants Innovative development of the light and textile industry. *Tekhnologii. Dizajn. Iskustvo*. [Technology. Design. Art], 2019. - pp. 164-166.
2. Vinogradov V.N. Effect of irradiation on corrosion of stainless. *Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet im. V.I. Lenina* [Ivanovo State Energy University named after. IN AND. Lenin], 1976. – pp. 26. – 29.
3. Boldyreva O. N. Zvyagintseva A. V., Boldyreva O. N., Zvyagintseva A. V. Corrosion of metals and alloys and basic methods of corrosion protection: textbook. *Voronezhskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet* [Voronezh State Technical University], 2009. – 190 p.
4. Shelukhina, Yu. M. Electrochemical corrosion of metals. *Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet* [Volgograd: Volgograd State Technical University], 2022. – 64 p.
5. Grigorov V.V. Purification of liquid media from undissolved radioactive impurities using filter elements with nanostructured membranes: dissertation for the degree of candidate of technical sciences

- Vitaly Vladimirovich Grigorov [Vitaly Vladimirovich Grigorov], Moscow, 2018. – 167 p.
6. Zharsky I. M., Ivanova N. P., Kuis D. V., Svidunovich N. A.. Corrosion and protection of metal structures and equipment. *Minsk : Vyshejschaya shkola Minsk* [Minsk: Higher School, 2012. – 303 p.
 7. Chernov, I. I. , Staltsov M. S., Kalin B. A. Intergranular corrosion of reactor structural materials. *Nacional'nyj issledovatel'skij yadernyj universitet MIFI* [National Research Nuclear University “MEPhI”], 2021. – 36 p.
 8. Naumov S. V., Samuilov A. Ya. Materials science. Protection against corrosion: Educational manual *Kazanskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnologicheskij universitet* [Kazan National Research Technological University], 2012. – 84 p.
 9. Korolev, V. I., Lastovtsev A. Yu. Ensuring the reliability of nuclear reactors of floating objects during design and operation. *Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* [Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education State University of Maritime and River Fleet named after. Admiral S.O. Makarova], 2017. – 204 p.

УДК 620.92

Влияние способа смешения пиролизного масла и угля на закономерности формирования газофазных продуктов сгорания

К.В. Слюсарский¹, А.К. Асильбеков²¹Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия, ¹konstantinsv@tpu.ru, ²aka2@tpu.ru

Статья поступила 14.11.2023 г.; после доработки 16.11.2023 г.

Аннотация

В статье представлены результаты исследования закономерностей выделения газофазных продуктов сгорания смесей низкосортного угля с пиролизным маслом переработки резинотехнических отходов с концентрацией 5, 10 и 15 масс.%, приготовленных двумя различными методами – пропитки и смачивания. Выделение NO носило аддитивный характер относительно состава смеси вне зависимости от способа приготовления, а выделение NO и CO₂ – при 800 °C для смоченных образцов. Для пропитанных образцов не наблюдались отдельные стадий горения компонент. Выделение NO было схожим с выделением CO₂, что было вызвано более равномерным объемным горением образца. Коэффициент вредности выброса сильнее всего зависил от температуры сгорания. Образцы, приготовленных методом пропитки, имели менее вредные выбросы (в среднем на 10 %), чем образцы, приготовленных методом смачивания.

Ключевые слова: пиролизное масло, низкосортный уголь, газофазные продукты, горение, коэффициент вредности.

Effect of mixing method of pyrolysis oil and coal on features of gas-phase combustion products formation

K.V. Slyusarskiy¹, A.K. Asilbekov²¹ Tomsk polytechnic university, Tomsk, 634050, Russia, ¹konstantinsv@tpu.ru, ²aka2@tpu.ru

Received 14.11.2023 y.; received in final form 16.11.2023 y.

Abstract

The article presents the results of a study of the features of release of gas-phase combustion products of mixtures of low-grade coal with pyrolysis oil from rubber waste processing with a concentration of 5, 10 and 15 wt.%, prepared by two different methods - impregnation and wetting. The release of NO has additive character in relation to composition of the mixture, regardless of the preparation method, as well as the release of NO and CO₂ was at 800 °C for wetted samples. For the impregnated samples, no separate stages of combustion of the components were observed. The release of NO was similar to that of CO₂, which was caused by a more uniform volumetric combustion of the sample. The emission factor was most dependent on the combustion temperature. Samples prepared by the impregnation method had less harmful emissions (on average by 10%) than samples prepared by the wetting method..

Keywords: pyrolysis oil, low-grade coal, gas-phase products, combustion, emission factor.

Введение

Пиролиз отходов различного происхождения является перспективным решением для утилизации широкого спектра органических отходов с возможностью получения продуктов с высокой добавочной стоимостью [1,2]. Основными

достоинствами подобных технологий по сравнению с простым сжиганием являются их большая экономическая эффективность и экологическая безопасность. Однако большинство пиролизных установок работают в эндотермическом режиме, т.е. требуют подвода теплоты извне, ввиду соответствующего характера данного процесса [3].

Наиболее очевидным источником данной теплоты является либо крайне дорогой электронагрев [4], либо сжигание горючего, включая не только горючие продукты пиролиза, но и более традиционные топлива [5]. При этом очевидным решением является сжигание выделяющихся горючих газов и жидких продуктов пиролиза. В настоящее время в литературе представлено два метода приготовления подобных смесей, основанных либо на полноценной пропитке твердого топлива жидкостью [6], либо на нанесении жидкости поверх материала [7]. Однако для поддержания экологичности подобной установки в целом следует контролировать концентрацию выделяющиеся в таком случае веществ [8]. Это связано с тем, что продукты пиролиза богаты инертными газами, серой и сложными углеводородами, а их удаление из дымовых газов – крайне сложно и затратно [9,10].

Самостоятельное сжигание пиролизной жидкости или её отдельных фракций связано с существенными проблемами, вызванными отличиями свойств от традиционных жидких энергетических топлив [11]. При этом данные отличия могут приводить к повышению выбросов антропогенных газов, что связано как с более высоким содержанием азота и серы, так и неполнотой сгорания её компонент. При этом комплексность процессов выделения и формирования газофазных продуктов сгорания предопределяет преимущественно эмпирический подход к их исследованию [12]. Это связано с большим числом факторов, оказывающих влияние на данные процессы, таких как состав топлива, коэффициент избытка воздуха [13], размер частиц топлива [14] и даже ширина зоны горения [15]. Большое число реакций и процессов, возникающих при сжигании смесей жидких продуктов пиролиза с твердыми топливами различного вида, ещё больше усложняют предсказание состава газофазных продуктов сгорания данных смесей. Способ приготовления топливной смеси также может оказывать значительное влияние на характеристики выделяемых продуктов сгорания. Данные по выбросам CO и CO₂ для смеси растительного рапсового масла с различными твердыми топливами продемонстрировали неаддитивное поведение относительно концентрации их компонент [6]. В частности, установлено, что при добавлении масла к низкорекреационному коксу выделение CO протекало в два этапа, соответствующих горению данных компонент. При этом для смеси с бурым углем был сформирован дополнительный пик в высокотемпературной

области, а для опилок и каменного угля установлено, что между концентрационными кривыми выделения газов при горении отдельно угля и его смеси с рапсовым маслом отличий практически нет. В настоящее время экспериментальные данные по составу газофазных продуктов сгорания смесей угля с пиролизным маслом, приготовленных разными методами, в литературе не представлены.

Целью данной работы было исследование закономерностей выделения газофазных продуктов сгорания смесей низкосортного угля с пиролизным маслом переработки резины с различной концентрацией, приготовленных двумя методами – поверхностного смачивания и равномерной пропитки.

Материалы и методы

Характеристики пиролизного масла и низкосортного угля

Для исследования был выбран низкосортный каменный уголь Красногорского месторождения (Кемеровская область). Детально характеристики данного топлива описаны в [16]. Данные технического анализа для него приведены в таблице 1. Пиролизное масло было получено в результате конденсации газообразных продуктов, выделяемых при переработке в инертной среде резинотехнических отходов.

Подробные характеристики данного вещества были исследованы в [16], основные приведены в таблице 1. Представленные свойства являются достаточно типичными для данных веществ.

Таблица 1. Характеристики исследованных топлив.

	Низкосортный уголь	Пиролизное масло
Влажность, масс.%	2,1	10
Зольность, масс.%	17,7	-
Содержание летучих, масс.%	7,2	50

Исследование состава газофазных продуктов сгорания

Характеристики зажигания и горения исследовались с помощью экспериментального стенда, включающего муфельную печь TSMР Ltd R14-U и проточный газоанализатор БОНЭР.

Экспериментальная процедура состояла в следующем. Навеска топлива заданной массы (в данном исследовании – равной ~2 мг) помещался

на предварительно охлажденный держатель координатного механизма. После этого включался привод, и топливо помещалось в печь с заданной температурой. Продукты сгорания удалялись из объема печи через газоанализатор, для определения концентрации различных веществ в них. В данной работе были проанализированы концентрации CO , CO_2 , NO , H_2S и SO_2 .

Смесь пиролизной жидкости с низкосортным углем приготавливалась двумя методами: путем предварительного смешения до получения равномерной смеси (метод пропитки) и путем нанесения жидкости на поверхность образца за счет помещения отдельных капель на её поверхность (метод смачивания). Исследовались составы с 5, 10 и 15 масс.% добавки пиролизной жидкости к низкосортному углю.

Результаты и дискуссия

Закономерности выделения монооксида и диоксида углерода

Концентрационные кривые выделения монооксида углерода для образцов, приготовленных различными методами при 600 и 800 °С, приведены на рис. 1 и 2, соответственно.

Концентрационные кривые позволяют сделать вывод о том, при низкой температуре греющей среды наблюдается два ярко выраженных пика, соответствующих горению отдельно добавки и угля. При этом, несмотря на практически полное отсутствие визуальных отличий между видом полученных концентрационных кривых, более высокие – в средней в 1,5 раза – значения были получены для образцов, приготовленных методом смачивания (с максимальной концентрацией, достигающей 0,9 об.%), что свидетельствует об их менее полном сгорании, чем для образцов, приготовленных методом пропитки (с максимальной концентрацией 0,6 об.%). Следует отметить, что сами значения концентраций CO в выделяемых газах при 600 °С практически не зависели от концентрации, что свидетельствует о том, что механизм их формирования зависит в первую очередь от температуры, а не величины добавки. Аналогичные закономерности наблюдались и для выделения CO при 800 °С., при этом наблюдались более явные зависимости величин концентрационных пиков от состава топлива.

Полученные концентрационные кривые выделения метана (рис. 3), очевидно являющегося результатом возгонки и неполного горения пиролизной жидкости, свидетельствуют о том, что в

ходе горения образцов, приготовленных методами смачивания, данный компонент сгорает не полностью.

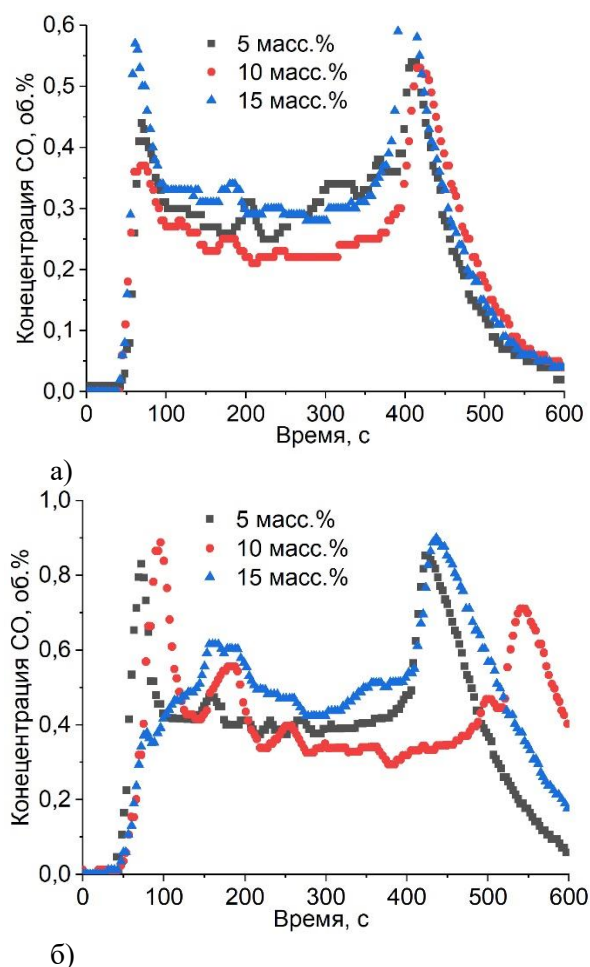


Рис. 1. Концентрационные кривые выделения монооксида углерода при горении при 600 °С смесей различного состава, приготовленных различными методами: а – пропитки, б – смачивания.

Совпадение временных диапазонов формирования данных пиков с концентрационными пиками CO подтверждает гомогенный характер горения пиролизной жидкости в составе данных смесей, т.е. она сначала испаряется, после чего загорается и сгорает уже в газовой фазе. Меньшая интенсивность выделения метана при 600 °С объясняется меньшей скоростью данного процесса.

Закономерности выделения CO_2 (рис.4) подтверждают сделанные ранее выводы о приоритетном сгорании добавки в начальный момент времени при 800 °С, что практически идентично кривым выделения CO . Отсутствие подобных пиков при 600 °С свидетельствуют о неполном сгорании добавки при данной температуре.

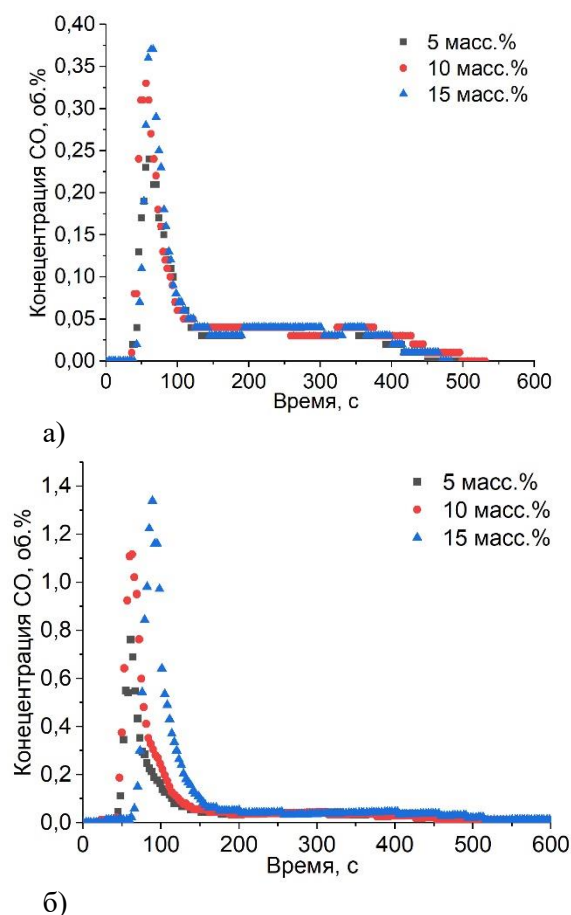


Рис. 2. Концентрационные кривые выделения монооксида углерода при горении при 800 °С смесей различного состава, приготовленных различными методами: а – пропитки, б – смачивания.

Также можно отметить более позднее выделение CO_2 для смесей, выполненных в результате смачивания, по сравнению образцами, полученными методом пропитки, при 600 °С.

Это свидетельствует о более раннем сгорании угля для данных образцов. Это коррелирует с выводом о том, что низкосортный уголь и пиролизная жидкость для полученных методом пропитки составов горят совместно, в то время как компоненты, полученные методом смачивания составов, демонстрировали более аддитивное поведение. Это связано с более полным проникновением пиролизной жидкости в образец при пропитке, что приводит к тепловыделению в его объеме и, как следствие, быстрому разогреву угля. В то же время пиролизная жидкость выделяется и горит в газовой фазе, что приводит к медленному разогреву самого угля и его поздней инициации. Суммарные выделения CO_2 в ходе горения образцов угля, приготовленных методами смачивания и пропитки, были достаточно близки, что свидетельствует об относительно полном сгорании всех образцов.

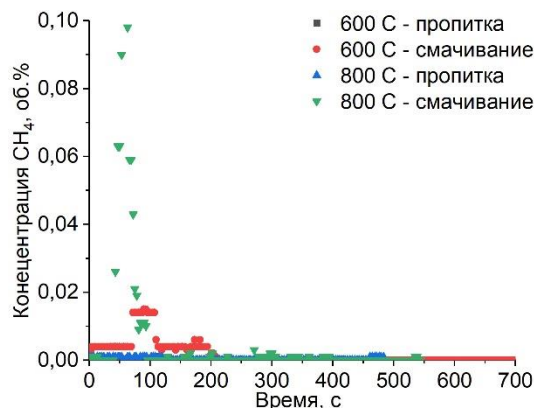


Рис. 3. Концентрационные кривые выделения метана при горении при различных температурах смеси угля с 10 масс.% добавки пиролизной жидкости, приготовленной различными методами.

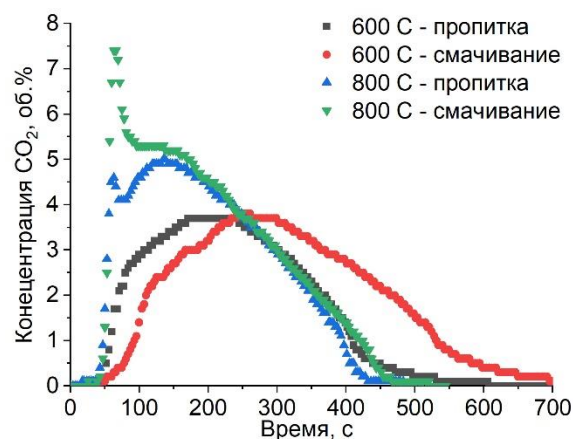


Рис. 4. Концентрационные кривые выделения диоксида углерода при горении при различных температурах смеси угля с 10 масс.% добавки пиролизной жидкости, приготовленной различными методами.

Закономерности выделения оксидов азота

Концентрационные кривые выделения монооксида азота при 600 и 800 °С для составов с 10 масс.% добавки пиролизной жидкости, внесенной методами пропитки и смачивания, представлены на рис. 5. Видно, что концентрационные кривые выделения оксида азота практически полностью повторяют концентрационные кривые выделения диоксида углерода. Это, наряду с практически полным отсутствием азота в низкосортном угле и пиролизной жидкости, свидетельствует о преобладании термического механизма формирования оксидов при горении.

Поскольку интенсивность выделения термических оксидов азота определяется температурой горения образца (аналогично полноте окисления CO до CO_2), можно сделать вывод о более высокой температуре горения смесей, приготовленных методом пропитки.

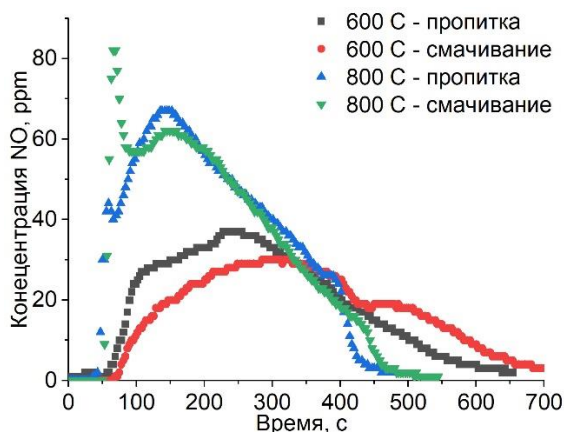


Рис. 5. Концентрационные кривые выделения оксида азота при горении при различных температурах смеси угля с 10 масс.% добавки пиролизной жидкости, приготовленной различными методами.

Это выражается как в более высокой максимальной концентрации, так и в немного большей подынтегральной площади, характеризующей общую величину выброса NO. Также следует отметить присутствие концентрационного пика выделения оксида азота для образцов, приготовленных методом смачивания, связанного с высокотемпературным газофазным сгоранием пиролизной жидкости в начале процесса нагрева топлива. Аналогичные результаты были получены и для диоксида азота.

Оценка общей величины выброса газофазных продуктов сгорания

Общая величина выброса газофазных продуктов сгорания, выраженных в величине подынтегральной площади концентрационных кривых выделения соответствующих газов, а также коэффициент их вредности, рассчитанный по представленной в [17] методике, приведены в таблице 2. Приведенные результаты в целом соответствуют представленным ранее выводам, сделанных в результате анализа концентрационных кривых выделения соответствующих компонент. Следует отметить, что для образцов, приготовленных методом смачивания, выбросы CO были больше, чем для образцов, приготовленных методом пропитки. Обратная ситуация наблюдалась в отношении выбросов CO₂, что свидетельствует о большей полноте сгорания угля, пропитанного пиролизным маслом.

Схожие закономерности наблюдались в отношении выбросов оксидов серы и сероводорода (таблица 2): для образцов, приготовленных методом пропитки, наблюдались большие концентрации H₂S и малые концентрации SO₂. Это опять же свидетельствует о более полном сгорании

первых и менее полном сгорании вторых, что вызвано тем фактом, что при смачивании сера пиролизной жидкости горит в газофазном пламени в условиях высокого избытка воздуха. В то же время, в пропитанных образцах сера окислялась внутри его объема в условиях недостатка кислорода, что приводит к большему выбросу серы в виде сероводорода.

Таблица 2. Выброс газофазных продуктов сгорания.

Доб.	Пропитка			Смачивание		
	600°C	700°C	800°C	600°C	700°C	800°C
CO, ppm·с						
5 %	134.8	32.7	20.5	235.2	76.4	38.6
10 %	145.8	37.0	23.3	256.5	83.7	51.4
15 %	163.3	38.5	24.8	279.1	108.1	60.6
CO ₂ , об.%·с						
5 %	1080	1292	1214	961	1377	1449
10 %	1063	1285	1281	1077	1428	1527
15 %	1025	1285	1237	1298	1578	1899
NO, ppm·с						
5 %	9825	15181	17318	11564	16744	17215
10 %	11796	16450	17087	12710	18441	17910
15 %	12095	16800	16623	12847	18506	18801
SO ₂ , об.%·с						
5 %	373	60	37	594	0	0
10 %	472	63	54	646	0	0
15 %	499	120	64	689	0	0
H ₂ S, ppm·с						
5 %	530	574	489	0	194	217
10 %	1088	1023	1051	10	207	206
15 %	1660	1340	1489	67	194	314
Коэффициент вредности выброса						
5 %	0.0422	0.0646	0.0736	0.0499	0.0784	0.0732
10 %	0.0506	0.0700	0.0726	0.0549	0.0786	0.0762
15 %	0.0519	0.0715	0.0707	0.0556	0.0790	0.0800

Анализ величины выбросов оксидов азота подтверждает сделанные ранее выводы. Наблюдались более высокие величины выброса при большей температуре греющей среды и концентрации добавки. В целом, для образцов, приготовленных методом пропитки, выброс NO был меньше, чем для образцов, приготовленных методом смачивания, что связано с её более равномерным горением.

Величины коэффициента вредности выброса свидетельствуют о том, что состав добавки слабо влиял на общую величину вредности получаемых выбросов, а наиболее сильное влияние наблюдалось для температуры греющей среды – повышение температуры повышало коэффициент вредности выброса. Отличия между значениями коэффициента вредности выброса для образцов, приготовленных различными методами, были незначительны, при этом немного меньшие

значения были получены в случае использования метода пропитки, что связано с более равномерным горением и, в результате, меньшей температурой в его ядре.

Заключение

В статье представлены результаты исследования закономерностей выделения газофазных продуктов сгорания смесей низкосортного угля с пиролизным маслом переработки резинотехнических отходов, приготовленных двумя различными методами – пропитки и смачивания. Установлено, что при низких температурах греющей среды, выделение оксидов углерода носило аддитивным характер относительно состава смеси вне зависимости от способа приготовления. аналогичное поведение наблюдалось в отношении выбросов оксидов азота и диоксида углерода при 800 °С для образцов, приготовленных методами смачивания. Для образцов, приготовленных методом пропитки, наблюдалось отсутствие отдельных стадий горения компонент смеси, а также более быстрое инициирование зажигания низкосортного угля. Концентрационные кривые выделения оксидов азота было схожи с кривыми выделения CO_2 , что было вызвано более равномерным горением образца в его объеме. Оценка величины коэффициента вредности выброса при горении всех исследованных составов продемонстрировала наиболее сильное влияние температуры греющей среды на данную величину. При этом у образцов, приготовленных методом пропитки, выбросы были менее вредными, чем у образцов, приготовленных методом смачивания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (проект № МК-2563.2022.1.2).

Список литературы

1. Zerín N.H. End-of-life tyre conversion to energy: A review on pyrolysis and activated carbon production processes and their challenges / N.H. Zerín, M.G. Rasul, M.I. Jahirul, A.S.M. Sayem // *Science of Total Environment*. – 2023. – Vol. 905. – P. 166981.
2. Qian Q. From plastic waste to potential wealth: Up-cycling technologies, process synthesis, assessment and optimization / Q. Qian, J. Ren // *Science of Total Environment*. – 2024. – Vol. 907. – P. 167897.
3. Астафьев А.В. Исследование тепловых эффектов пиролиза соломы для оценки возможности его реализации в автотермическом режиме / А.В. Астафьев, Р.Б. Табакаев, Д.Е. Мусафиров, А.С. Заворин, Ю.В. Дубинин, Н.А. Языков, В.А. Яковлев // *ХИМИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ*, 2019. – № 2. – С. 271–280.
4. Зайченко В.М. Исследование процесса низкотемпературного пиролиза / В.М. Зайченко, О.М. Ларина, В.В. Кувшинов, Е.Г. Какушина // *Энергетические установки и технологии*. – 2019. – Вып. 5. – № 3. – С. 48–52.
5. Афанасьева О.В. Термодинамическая эффективность угольной мини-тэс с пиролизом и газификацией / О.В. Афанасьева, Г.Р. Мингалеева // *Труды Академэнерго*, 2007. – № 3. – С. 52–61.
6. Feoktistov D.V. Impregnation of different coals and biomass with rapeseed oil for intensifying their ignition in a heated air stream during oil-free boiler start-up / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, A.E. Nurpeis, E.G. Orlova, A.S. Samoilov, A.M. Zhizhaev, A.V. Zhuikov // *Fuel Processing Technology*. – 2022. – Vol. 236. – P. 107422.1-12.
7. Larionov K.B. Activation of anthracite combustion by copper acetate: mechanism, effect of particle size and introduction method / K.B. Larionov, I. V. Mishakov, N.I. Berezikov, A.S. Gorshkov, A.Z. Kaltaev, K. V. Slyusarskiy, A.S. Ruban, A.A. Vedyagin // *International Journal of Coal Science & Technology*. – 2023. – Vol. 10. – P. 13-24.
8. Mello M. Waste tire pyrolysis and desulfurization of tire pyrolytic oil (TPO) – A review / M. Mello, H. Rutto, T. Seodigeng // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2023. – Vol. 73. – P. 159–177.
9. . Мирошниченко С.Т. Применение метода абсорбции для очистки газовоздушных выбросов / С.Т. Мирошниченко, В.А. Пухлий, Р.А. Ильчевский, В.А. Марунин, В.О. Пантель // *Энергетические установки и технологии*, 2020. – № 1. – С. 105–117.
10. Пухлий В.А. К вопросу очистки газовых выбросов от сероводорода, сероуглерода и сернистого ангидрида / В.А. Пухлий, А.А. Журавлев, К.В. Пухлий // *Энергетические установки и технологии*, 2017. – № 2. – С. 72–81.
11. Забелкин С.А. Энергетическое использование жидких продуктов быстрого пиролиза древесины / С.А. Забелкин, Д.В. Тунцев, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров // *Лесной вестник*, 2010. – № 4. – С. 79–83.
12. Иваницкий М.С. Анализ технологических условий образования и выгорания канцерогенных ПАУ в продуктах сгорания котлов / М.С. Иваницкий // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*, 2021. – № 5. – С. 131–138.
13. Кохтавшили Н.Т. Анализ концентрации оксидов азота в уходящих газах котлов ТЭС от влияния различных режимно-технологических факторов процесса горения / Н.Т. Кохтавшили // *Аллея науки*, 2020. – № 8. – С. 399–403.
14. Гасилин В.В. Влияние размеров частиц угля на характеристики продуктов сгорания установки с пониженным содержанием вредных выбросов / В.В. Гасилин, В.Г. Крюков // *Вестник КГТУ им.*

- А.Н.Туполева, 2018. – № 3. – С. 11–16.
 15. Шайкин А.П. Взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов с шириной зоны турбулентного горения при сгорании топливно-воздушной смеси с добавкой водорода / А.П. Шайкин, П.В. Ивашин, И.Р. Галиев, А.В. Бобровский, А.Д. Дерячев, Н.А. Дурманова // Известия самарского научного центра Российской Академии Наук, 2017. – № 1. – С. 64–69.
 16. Larionov K.B. Activation of Anthracite Combustion Using Pyrolysis Oil from Thermal Conversion of Waste Car Tires / K.B. Larionov, K. V. Slyusarskiy, S.A. Tsibulskiy, A.Z. Kaltaev, N.I. Berezikov, A.S. Gorshkov, S. V. Lavrinenko, V.E. Gubin // ACS Omega. – 2021. – Vol. 6. – P. 19731–19739.
 17. Росляков П.В. Оценка суммарной вредности уходящих газов котельной установки / П.В. Росляков, И.А. Закиров, И.Л. Ионкин, Л.Е. Егорова // Теплоэнергетика, 2005. – № 9. – С. 30–34.
- ### References
1. Zerín N.H., Rasul M.G., Jahirul M.I., Sayem A.S.M. End-of-Life Tyre Conversion to Energy: A Review on Pyrolysis and Activated Carbon Production Processes and Their Challenges. *Science of Total Environment*, 2023, vol. 905, pp. 166981. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.166981.
 2. Qian Q., Ren J. From Plastic Waste to Potential Wealth: Upcycling Technologies, Process Synthesis, Assessment and Optimization. *Science of Total Environment*, 2024, vol. 907, pp. 167897. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.167897.
 3. Astafiev A.V., Tabakaev R.B., Musafirov D.E., Zavorin A.S., Dubinin Yu.V., Yazykov N.A., Yakovlev V.A. Study of the thermal effects of straw pyrolysis to assess the possibility of its implementation in autothermal mode. *Khimiya rastitelnogo syrya*, 2019, pp. 271–280.
 4. Zaichenko V.M., Larina O.M., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G. Research on low temperature pyrolysis process. *Energeticheskie ustanovki i tehnologii*, 2019, vol. 5, pp. 48–52.
 5. Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R. Thermodynamic efficiency of coal mini-chp plant with pyrolysis and gasification. *Trudi Akademenergo*, 2007, pp. 52–61.
 6. Feoktistov D.V., Glushkov D.O., Nurpeiis A.E., Orlova E.G., Samoilov A.S., Zhizhaev A.M., Zhuikov A.V. Impregnation of Different Coals and Biomass with Rapeseed Oil for Intensifying Their Ignition in a Heated Air Stream during Oil-Free Boiler Start-Up. *Fuel Processing Technology*, 2022, vol. 236, pp. 107422.1–12.
 7. Larionov K.B., Mishakov I. V., Berezikov N.I., Gorshkov A.S., Kaltaev A.Z., Slyusarskiy K. V., Ruban A.S., Vedyagin A.A. Activation of Anthracite Combustion by Copper Acetate: Mechanism, Effect of Particle Size and Introduction Method. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2023, vol. 10, pp. 13–24.
 8. Mello M., Rutto H., Seodigeng T. Waste Tire Pyrolysis and Desulfurization of Tire Pyrolytic Oil (TPO) – A Review. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2023, vol. 73, pp. 159–177.
 9. Miroshnichenko S.T., Pukhliy V.A., Ilchevsky R.A., Marunich V.A., Pantel V.O. Application of the absorption method for purifying gas-air emissions. *Energeticheskie ustanovki i tehnologii*, 2020, vol. 6, pp. 105–117.
 10. Pukhliy V.A., Zhuravlev A.A., Pukhliy K.V. On the issue of cleaning gas emissions from hydrogen sulfide, carbon disulphide and sulfur dihydride. *Energeticheskie ustanovki i tehnologii*, 2017, vol. 3, pp. 72–81.
 11. Zabelkin S.A., Tuntsev D.V., Grachev A.N., Bashkurov V.N. Energy Use of Liquid Products of Fast Pyrolysis of Wood. *Lesnoy vestnik*, 2010, pp. 79–83.
 12. Ivanitsky M.S. Analysis of Technological Conditions for the Formation and Burnout of Carcinogenic PAHs in Boiler Combustion Products. *Izvestiya vyschikh uchebnikh zavedeniy. Problemi energetiki*, 2021, vol. 23, pp. 131–138.
 13. Kokhtavshili N.T. Analysis of the Concentration of Nitrogen Oxides in the Exhaust Gases of TES Boilers from the Influence of Various Regime and Technological Factors of the Combustion Process. *Alleya nauki*, 2020, vol. 1, pp. 399–403.
 14. Gasilin V.V., Krukov V.G. Influence of coal particle sizes on the characteristics of combustion products of an installation with a reduced content of harmful emissions. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2018, vol. 74, pp. 11–16.
 15. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Bobrovsky A.V., Deryachev A.D., Durmanova N.A. Relationship between the concentration of unburned hydrocarbons and the width of the turbulent combustion zone during the combustion of a fuel-air mixture with the addition of hydrogen. *Izvestiya samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2017, vol. 19, pp. 64–69.
 16. Larionov K.B., Slyusarskiy K. V., Tsibulskiy S.A., Kaltaev A.Z., Berezikov N.I., Gorshkov A.S., Lavrinenko S. V., Gubin V.E. Activation of Anthracite Combustion Using Pyrolysis Oil from Thermal Conversion of Waste Car Tires. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, pp. 19731–19739.
 17. Roslyakov P.V., Zakirov I.A., Ionkin I.L., Egorova L.E. Assessment of the Total Harmfulness of Exhaust Gases of a Boiler Plant. *Teploenergetika*, 2005, pp. 30–34.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал входит в национальную библиографическую базу данных РИНЦ.
Принимаются статьи на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована и содержать:

- постановку проблемы, ее связь с актуальными научными или практическими заданиями;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящается данная статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших поисков в данном направлении.

К статье должно прилагаться:

- два экземпляра рукописи статьи, выполненной в соответствии с требованиями, первый экземпляр, подписанный всеми авторами;
- оригинал экспертного заключения о возможности опубликования данной работы в открытой печати;
- рецензия, подписанная доктором наук или кандидатом наук;
- информация об авторах статьи (заголовок статьи, фамилия, имя и отчество (полностью), должность, ученая степень, полный почтовый адрес, контактные телефоны и адреса электронной почты).

ОПИСАНИЕ МАКЕТА СТАТЬИ

Статья должна представляться также в электронном виде файлом, подготовленном в текстовом процессоре MS Word в режиме разметки страницы. Файл следует сохранять с расширением *.doc(или *.rtf) без макросов.

Имя файла должно начинаться фамилией контактирующего автора на латинице. Основной текст набирается шрифтом «Times New Roman» (11 пт) через интервал с автоматической расстановкой переносов в две колонки с расстоянием между ними 10 мм.

Ширины верхнего поля – 27 мм, нижнего – 23 мм, левого и правого – 18 мм, первый ряд — отступ 0,75 см.

Название статьи – шрифт 16 пт, ФИО – шрифт 14 пт. Сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, список литературы – шрифт 10 пт.

Рисунки выполняются в графических редакторах и (или) процессорах (Paint, PhotoShop, CorelDraw и т.п.) в с разрешением 300dpi.

Шаблон статьи и требования по ее оформлению приведены на сайте СевГУ: <https://www.sevsu.ru/>.

Статьи, не удовлетворяющие шаблону и требованиям к оформлению, рассматриваться не будут.

Более детальную информацию можно получить в редакции журнала:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация. E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru, телефон. +7(8692) 71-01-64.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Выпуск № 4, Том 9 2023 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами

05.14.01 Энергетические системы и комплексы

05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование

05.14.08 Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

05.26.05. Ядерная и радиационная безопасность

Адрес редакции:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7.

Телефон редакции: 8(692) 710164

<https://old.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/1272-njeut>

e-mail: nauchnyyzhurnal@mail.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053.

№ рег. СМИ: ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

Главный редактор: Якимович Борис Анатольевич

Подписано к печати 14.12.2023. Заказ 47/23. Дата выхода в свет: . Тираж 65 экз.
Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 10,69.

Севастополь, 2023