

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 № 3

**Севастополь
2023**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь:
ФГАОУ ВО СевГУ, 2023. – Т. 9. - № 3. – 96 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

Тепловые и ядерные энергетические установки	5
<i>Качур С.А.</i> Дуализм пространственно-временного монополя реактора	5
<i>Качур С.А.</i> Структура пространственно-временного монополя реактора и гравитационные взаимодействия	10
Электротехнические комплексы и системы	16
<i>Канов Л.Н., Конева С.А., Пронина А.К.</i> Математическое моделирование передачи электроэнергии от удаленных ветровых и волновых электростанций	16
<i>Канов Л.Н., Алёшкин Д.И.</i> Диагностика электрических систем переменного тока на основе комплексных нейронных сетей	23
<i>Поваляев П.В., Болатова Ж.С., Власов А.В., Пак А.Я., Мартынов Р.С.</i> Масштабирование электродугового реактора постоянного тока для синтеза карбида вольфрама в открытой воздушной среде	28
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	37
<i>Жиганов И.Г., Кувишинов В.В., Никоненко А.В., Касницкий А.Д., Березняк В.А.</i> Опытная комбинированная биоэнергетическая установка	37
<i>Ивантеев И.С., Жильцов А.С., Бахтина Н.В., Коломийченко В.П., Артеменко И.Д.</i> Возможности использования возобновляемой энергетики для обеспечения портовой инфраструктуры	45
<i>Какушина Е.Г.</i> Инновационные методы генерирования и преобразования энергии	54
<i>Нашев Р.А., Кувишинов В.В., Бахтина Н.В., Коломийченко В.П., Власов Н.А.</i> Применение геотермальной энергетики для коммунальных потребителей Севастополя	58
<i>Синица М.О., Комишин А.С.</i> Технология контроля основных узлов ВЭУ на этапах производства	63
Экологическая безопасность	73
<i>Асильбеков А.К., Губин А.В., Ларионов К.Б.</i> Исследование закономерности зажигания и горения топливных пеллет, выполненных из различных типов древесины	73
<i>Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И., Поджаров Ю.С.</i> Экспериментальные исследования влияния кавитационной обработки водоугольных топлив в составе с пирогенетической жидкостью на их свойства	79
<i>Козырь Д.А., Губин В.Е., Янковский С.А.</i> Оценка экологической эффективности ресурсосберегающих проектов топливно-энергетического комплекса	86
Для авторов	94

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant	5
<i>Kachur S.A.</i> Dualism of the space-time monopole of the reactor	5
<i>Kachur S.A.</i> The structure of the reactor's space-time monopole and gravitational interactions	10
Electrotechnical complexes and systems	16
<i>Kanov L.N., Koneva S.A., Pronina A.K.</i> Mathematical design of passing to electric power from remote wind and wave power-stations	16
<i>Kanov L.N., Aleshkin D.I.</i> Diagnostics of the electric systems of alternating current on the basis of complex neuron networks	23
<i>Povalyaev P.V., Bolatova Zh.S., Vlasov A.V., Pak A.Ya., Martynov R.S.</i> Scaling up a DC arc reactor for tungsten carbide synthesis in an open-air atmosphere	28
Alternative and renewable energy sources	37
<i>Zhiganov I.G., Kuvshinov V.V., Nikitenko A.V., Kasnitsky A.D., Bereznyak V.A.</i> Experimental combined bioenergy installation	37
<i>Ivanteev I.S., Zhiltsov A.S., Bakhtina N.V., Kolomiychenko V.P., Artemenko I.D.</i> Opportunities for using renewable energy to provide port infrastructure	45
<i>Kakushina E.G.</i> Innovative methods of generating and converting energy	54
<i>Nashev R.A., Kuvshinov V.V., Bakhtina N.V., Kolomiychenko V.P., Vlasov N.A.</i> Application of geothermal energy for municipal consumers of Sevastopol	58
<i>Sinita M.O., Komshin A.S.</i> The technology of control of the main wind turbine units at the production stages	63
Environmental Safety	73
<i>Asilbekov A.K., Gubin A.V., Larionov K.B.</i> Research of the patterns of ignition and combustion of fuel pellets made from various types of wood	73
<i>Gvozdnyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I., Podzharov Yu. S.</i> Experimental studies of the effect of cavitation treatment of coal-water fuels in composition with pyrogenetic liquid	79
<i>Kozyr D.A., Gubin V.E., Jankovsky S.A.</i> Assessment of the environmental efficiency of resource-saving fuel and energy complex projects	86
For cars	94

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.56

Дуализм пространственно-временного монополя реактора

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 01.09.2023 г.; после доработки 04.09.2023 г.

Аннотация

Рассмотрено пространство монополя реактора как система пространств двух видов сингулярности. Определены условия возникновения этой системы.

Ключевые слова: пространственно-временной монополь, ядерный реактор, голая сингулярность, скрытая сингулярность, электромагнитное излучение.

Dualism of the space-time monopole of the reactor

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 01.09.2023 y.; received in final form 04.09.2023 y.

Abstract

The reactor monopole space is considered as a system of spaces of two types of singularity. The conditions for the emergence of this system are determined.

Keywords: naked space-time monopole, nuclear reactor, naked singularity, hidden singularity, electromagnetic radiation.

Введение

Считается, что начало реальных исследований влияния электромагнитного излучения на изменение метрики пространства-времени было положено в период Второй мировой войны. И связывают это с так называемым «филадельфийским экспериментом», в результате которого возникли совершенно необычные явления. Предполагается, что изначальной целью эксперимента являлось размагничивание корабля, стремление сделать его «невидимым» для магнитных мин противника. Но по легенде эсминец «Элдридж» стал невидимым для наблюдателей, исчезал физически и затем появлялся вновь. Для создания излучения использовались мощные электрогенераторы. На то время человечество еще не знало о возможностях применения ядер-

ной энергии. Мощность электромагнитного излучения, возникающего при взрыве атомной бомбы, на порядки превышает мощность аналогичного излучения, получаемого в результате работы электрогенераторов.

Представляется, что поскольку именно электромагнитное излучение приводит к возникновению пространственно-временных эффектов, целесообразно в экспериментах по искривлению, изменению пространства-времени использовать ядерные реакторы. Проблема состоит в том, что необходимо заглушить ядерный реактор на грани взрыва. При этом энергия потенциального взрыва должна искривить пространство за счет электромагнитного излучения, порождаемого ядерными реакциями. Гипотеза о механизме создания искривленного пространства на базе ядерного реактора рассмотрена в работах

[1-10].

В монографии [9] дается описание двух видов искривления пространства, порожденных в результате управления реактором, который находится в состоянии мгновенной критичности. Преобразование энергии ядерного взрыва приводит к созданию монополя реактора, то есть области пространства вблизи реактора, в котором происходит чередования зон расширения, задержки и сжатия. В зависимости от подавляющего взрыв воздействия может возникнуть один из следующих видов искривления пространства монополя: черная дыра (скрытая сингулярность) и белая дыра (голая сингулярность). Последовательность зон различного течения времени и влияния гравитации противоположна для этих пространств монополя.

В статье [10] проведено исследование волны, искривляющей пространство монополя реактора. Представлена попытка связать природу этой волны с гравитационными и электромагнитными волнами. Описание и исследование искривляющей пространство волны дано для одного вида сингулярности.

Представляется, что пространство монополя реактора вида «скрытая сингулярность» и пространство монополя реактора вида «голая сингулярность» не являются независимыми.

Цель исследования – определить взаимосвязь двух пространств монополя реактора, описываемых, как «скрытая сингулярность» и «голая сингулярность»

Пространство монополя реактора как система пространств двух видов сингулярности

Выдвигается гипотеза, что исходное пространство реактора, как и любое другое пространство объекта, обладающего энергией, содержит в себе в латентном состоянии, как черную дыру, так и белую дыру. Для предотвращения взрыва реактора, находящегося в состоянии мгновенной критичности, необходима внешняя энергия сжатия. Эта внешняя энергия направляет энергию взрыва на разрыв, кручение исходного пространства, выделяя из него пространство черной дыры и белой дыры. Три пространства существуют параллельно друг другу. Пространство одной сингулярности является ведущим, основным, задающим параметры искривления, а пространство второй сингулярности становится ведомым, сформированным по параметрам первого пространства.

Если взрыв направленный, что имеет место

при разрушении ядерного реактора, то при направлении внешнего воздействия перпендикулярно направлению взрыва формируются как ведущее пространство скрытой сингулярности (черной дыры). Если направление внешнего воздействия противоположно направлению взрыва, то ведущее пространство имеет вид «голая сингулярность». Для ненаправленных взрывов реакторов всегда ведущей образуется белая дыра.

Покажем графически, как взаимосвязаны пространства двух видов сингулярности. В качестве границы исходного пространства реактора примем сферу, хотя в действительности в земных условиях за счет гравитационных сил граница пространства представляется сплюснутым эллипсоидом. Черная дыра описывается гиперболоидом, а белая дыра представляет тор, охватывающий гиперболоид (рис. 1).

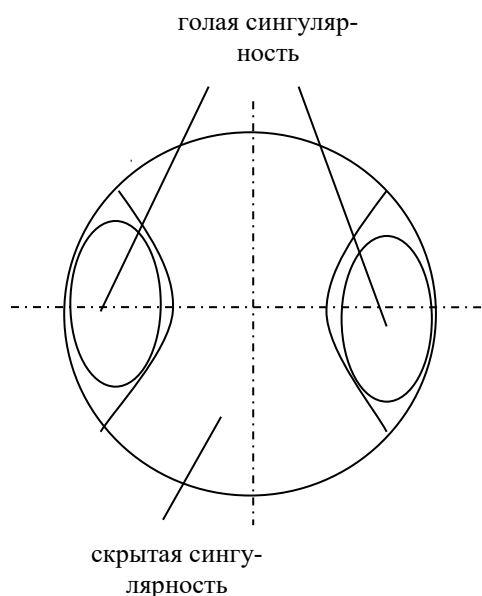


Рис. 1. Взаиморасположение пространств разных видов для монополя реактора.

Вычленим из исходного пространства монополи разных типов и определим для них расположение зон искривления по диаметру исходного пространства, а, следовательно, гравитационных волн (рис.2).

Объединение двух видов сингулярности в исходном пространстве даст нам пространственную волну, подобную электромагнитным волнам (рис. 3).

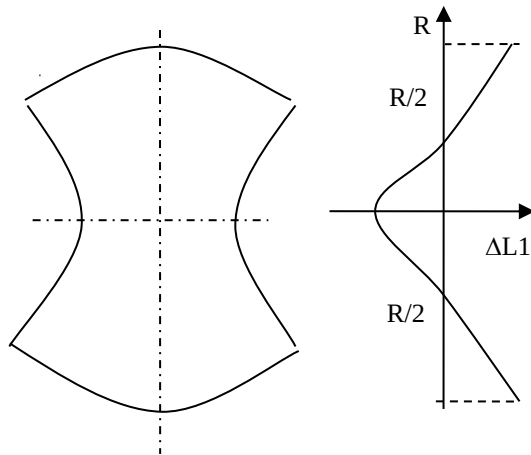
В [9] приводятся следующие расстояния от центра сферы, то есть ядерного реактора для различных зон искривления пространства скрытой сингулярности

$$R_1 = \frac{c}{2\omega_{MP}},$$

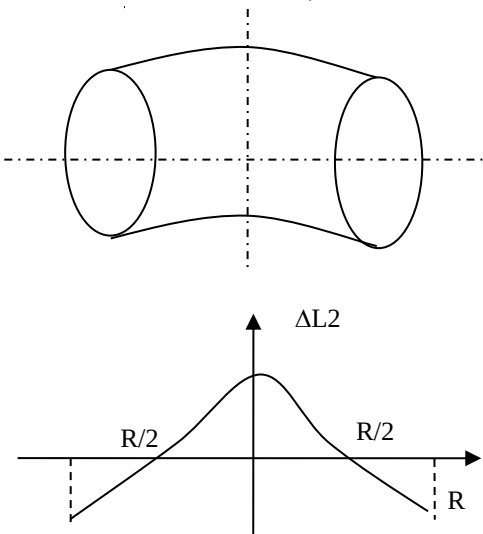
$$R_2 = R_1 k_p,$$

$$R_3 = 2R_2,$$

где k_p – коэффициент искривления пространства, R_1 – радиус границы зоны сжатия, R_2 – радиус границы зоны задержки, R_3 – радиус границы зоны расширения ($R=R_3$).



а)



б)

Рис. 2. Монополь и гравитационная волна для вида «скрытая сингулярность» (а) и «голая сингулярность» (б). Обозначения: ΔL_1 , ΔL_2 – изменение пространства для скрытой и голой сингулярности соответственно, R – радиус сферы границы исходного пространства.

Таким образом, в пространственной волне (рис.3) нет зоны задержки, связанной с другими

зонами соотношением

$$R_2 = R_1 - R_3.$$

В статье [10] представлена волна искривления монополя ядерного реактора вид «скрытая сингулярность» (рис. 4)

Появление зоны задержки обусловлено взаимодействием двух пространств различного вида, то есть черной дыры и белой дыры. Зоны задержки не позволяют искривленным пространствам поглотить друг друга и сжаться до точки исходного пространства. Схематично расположение этих зон представлено на рис. 5.

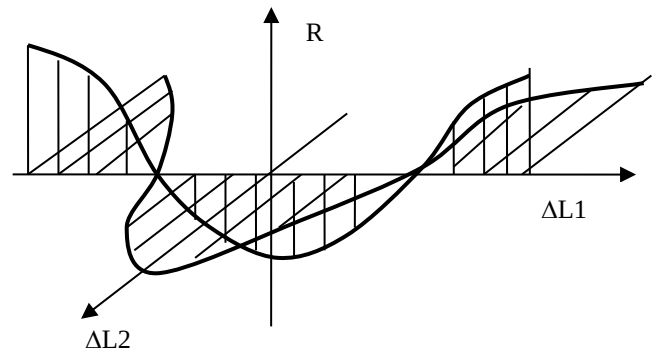


Рис. 3. Пространственная волна монополя реактора.

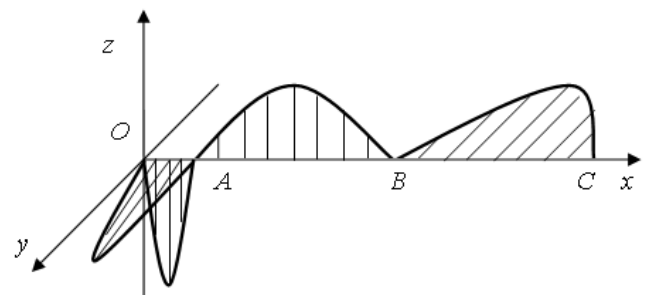


Рис. 4. Волна искривления пространства реактора. Обозначения: ОА – область сжатия, АВ – область задержки, ВС – область расширения; оси x , y , z определяют пространство, время, гравитационную постоянную соответственно.

В зонах задержки время не изменяется относительно исходного пространства, следовательно, $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 0$, но события происходят с некоторым запаздыванием по сравнению с исходными. Кроме того, в зоне задержки сила тяжести возрастает в $\sqrt{2}$ раз, а в зоне сжатия уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Необходимо отметить, что в зоне сжатия амплитуды волны увеличивается по модулю в зависимости от коэффициента искривления пространства. Суммарная пространственная волна представлена на рис. 6.

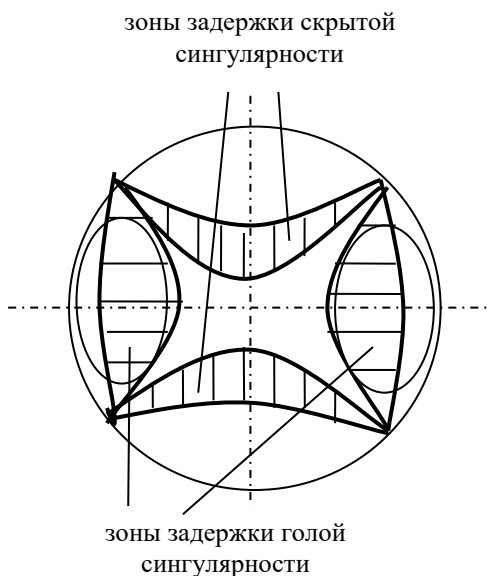


Рис. 5. Расположение зон задержки в искривленных пространствах.

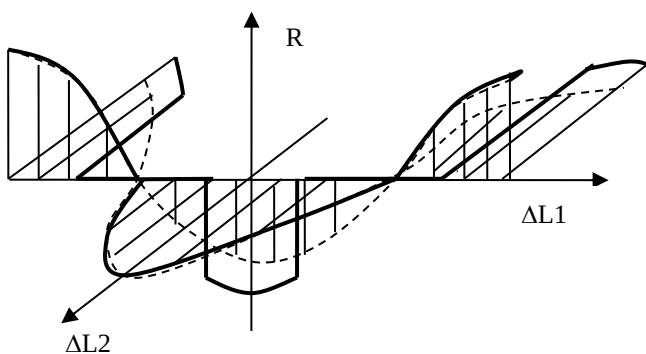


Рис. 6. Суммарная пространственная волна монополя реактора.

Вход из исходного пространства возможен только в ведущее пространство. Попадание в ведомое пространство происходит из ведущего через зоны задержки.

Дуализм присущ не только монополю ядерного реактора, но и монополям естественных реакторов. Если существует космический реактор теории Гамова, и, как считает современная наука, наша Вселенная расположена в черной дыре, то существует вторая, подобная Вселенная, связанная с нашей Вселенной, находящаяся в белой дыре.

Заключение

Определена взаимосвязь двух пространств монополя реактора, описываемых, как «скрытая сингулярность» и «голая сингулярность». Показано, что исходное пространство при преобразо-

вании энергии взрыва ядерного реактора, находящегося в состоянии мгновенной критичности, порождает два пространства, белую дыру и черную дыру, связанных между собой зонами задержки.

Исследование направлено на развитие теории пространства-времени, космологии, открывает новые возможности для освоения дальнего космоса.

Список литературы

1. Качур С.А. Управление ядерными реакторами на основе кривизны пространства. – Севастополь: «РИБЕСТ», 2016. – 220с.
2. Качур С.А. Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №1. – С. 12-19.
3. Качур С.А. Модуляция сингулярности ядерного реактора вблизи мгновенной критичности. // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2015. – Т.1. – №1. – С. 18-26.
4. Качур С.А. Энтропийный анализ безопасности управления ядерным реактором посредством электромагнитного излучения // Пром. теплотехника, 2013. – Т.35, Вып. 4. – С.18-22.
5. Качур С.А. Частотный метод построения систем электромагнитного управления ядерным реактором вблизи мгновенной критичности // Пром. теплотехника, 2013. – Т.35, Вып. 5. – С.27-32.
6. Качур С.А. Движение космического аппарата на основе модуляции кривизны пространства // Радиоэлектроника и информатика, 2013. – Вып. 2(21). – С.22-26.
7. Качур С.А. Модуляция кривизны пространства на основе системы ядерных реакторов // Сб.науч.тр.СНУЯЭиП – Севастополь: СНУЯЭиП, 2014. – Вып. 2(50). – С.13-26.
8. Качур С.А. Движение нерелятивистского объекта в искривленном пространстве ядерного реактора // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №2. – С. 5-10.
9. Качур С.А. Теория пространственно-временных монополей реакторов – Севастополь: РИБЕСТ, 2019. – 364с.
10. Качур С.А. Волны искривления пространства монополя реактора как // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2019. – Т.5. – №2. – С. 5-10.

References

1. Kachur S.A. *Upravlenie yadernymi reaktorami na os-*

- nove krivizny prostranstva* [Control by nuclear reactors on the basis of space curvature]. Sebastopol: «RIBEST». 2016. 220p.
2. Kachur S.A. Space curvature of nuclear reactor near-by prompt criticality by means of natural spatio-temporal monopole. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 1, pp. 12-19.
 3. Kachur S.A. Singularities modulation of nuclear reactor near-by instantaneous criticality. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2015, Vol. 1, No 1, pp. 18-26.
 4. Kachur S.A. Entropic analysis of safety of management by a nuclear reactor by means of electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 4, pp. 18-22.
 5. Kachur S.A. Frequency method of construction of the electromagnetic control systems by a nuclear reactor near-by instantaneous criticism. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 5, pp. 27-32.
 6. Kachur S.A. Movement of space vehicle on the basis of modulation of space curvature. *Radioelektronika i informatika*, 2013, No. 2(21), pp. 22-26.
 7. Kachur S.A. Modulation of space curvature on the basis of the nuclear reactors system. *Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, Sebastopol, SNUYaE i P, 2014, No. 2(50), pp. 13-26.
 8. Kachur S.A. Movement of nonrelativistic object in the distorted space of nuclear reactor. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 2, pp. 5-10.
 9. Kachur S.A. *Teoriya prostranstvenno-vremennyh monopoliej reaktorov* [Theory of space-time monopolies of reactors]. Sebastopol, RIBEST, 2019, 364p.
 10. Kachur S.A. Curvature waves of the reactor monopole space as a special case of gravitational waves *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2019, Vol. 5, No 2, pp. 5-10.

УДК 621.039.56

Структура пространственно-временного монополя реактора и гравитационные взаимодействия

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 01.09.2023 г.; после доработки 04.09.2023 г.

Аннотация

Разработана модель структур пространственно-временных монополей ядерных реакторов. Определен новый взгляд на основные положения теории гравитации. Рассмотрена возможность построения траекторий межгалактических полетов космических аппаратов с использованием пространственных сетей Вселенной.

Ключевые слова: ядерный реактор, теория гравитации, туннельный переход, пространственно-временной монополь, траектория полета.

The structure of the reactor's space-time monopole and gravitational interactions

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 01.09.2023 y.; received in final form 04.09.2023 y.

Abstract

A model of the structures of spatio-temporal monopolies of nuclear reactors has been developed. A new view on the basic provisions of the theory of gravity is defined. The possibility of constructing trajectories of intergalactic spacecraft flights using spatial networks of the Universe is considered.

Keywords: naked nuclear reactor, gravity theory, tunnel junction, space-time monopole, flight path.

Введение

Современная теория гравитации [1-5] претерпевает постоянные изменения в свете появления новых фактов в области астрофизики, физики и астрономии.

Квантовая теория гравитации в настоящее время находится в стадии становления, и вопросов больше, чем ответов.

В случае слабого гравитационного поля квантовая теория гравитации приводит к тем же самым уравнениям движения, что и общая теория относительности.

Несмотря на это, основные положения квантовой теории гравитации принципиально отличаются от основных положений общей теории

относительности. Наиболее существенные отличия следующие.

С точки зрения квантовой теории гравитации вблизи большой массы изменяются величины скорость света, постоянная Планка и масса (c , $\hbar$, m). Например, вблизи большой массы возрастает величина скорости света и уменьшается значение постоянной Планка.

Кроме того, возрастает частота колебаний ω любой спектральной линии, то есть возрастает скорость протекания физических процессов. Так как любой эталон времени или длины (период колебаний спектральной линии, длина волны спектральной линии, размер атома и т. д.) изменяется в зависимости от значения величин c , $\hbar$,

m (и любой эталон можно выразить в виде некоторой комбинации этих величин), то, следовательно, вблизи большой массы изменяются все эталоны времени и длины. То есть изменяется пространственно-временной масштаб. Именно это и приводит к искривлению траектории движущейся частицы.

В основе общей теории относительности лежат совершенно иные предположения. С точки зрения общей теории относительности вблизи большой массы понижается частота колебаний любой спектральной линии, вследствие чего все физические процессы замедляются. Например, замедляется скорость распространения электромагнитных колебаний (скорость света). Тем не менее, уравнения движения частицы в общей теории относительности практически совпадают с уравнениями движения в квантовой теории гравитации.

Гипотеза о наличии пространственно-временного монополя у ядерных, термоядерных естественных реакторов позволяет устранить противоречия между ОТО и квантовой теорией, поскольку в зависимости от расстояния до ядра монополя время может как ускоряться (скорость света увеличивается), так и замедляться (скорость света уменьшается).

При определенных условиях для ядерного реактора в состоянии близком к мгновенной критичности возникает полевая структура, включающая пространства различной кривизны. Представляется, что подобные структуры присущи всем космическим объектам (планетам, звездам, черным дырам, галактикам, Вселенной и т.п.). Такие структуры предложено называть пространственно-временными монополями [6]. Кроме того, в земных условиях создание монополя ядерного реактора невозможно без использования монополей таких естественных реакторов как Земля (естественный ядерный реактор) и Солнца (естественный термоядерный реактор).

Наличие пространственно-временных монополей естественных реакторов позволяет по-иному рассматривать гравитационные взаимодействия макрообъектов, определяя их как взаимодействие монополей естественных реакторов. Это позволяет рассчитывать траектории полетов космических аппаратов как путешествие по лабиринтам Вселенной, построенных монополями планет, звезд, галактик.

Цель исследования – создание модели структуры пространственно-временного монополя ядерного реактора, позволяющей описывать гравитационные взаимодействия космиче-

ских объектов для расчетов траекторий межгалактических полетов космических аппаратов.

Проблема квантовой теории гравитации и теории кротовых нор

Квантовая теория гравитации – это новая теория, альтернативная общей теории относительности, которая в настоящее время признана в качестве единственной теории гравитации.

В современной физике нет точного определения того, что означает «квантовая теория гравитации». Иногда под квантовой теорией гравитацией подразумевают квантование гравитационных волн в общей теории относительности, иногда – теорию квантовых полей в искривленном пространстве-времени. Под квантовой теорией гравитации подразумевается теория гравитации, основанная на принципах квантовой механики, то есть теория гравитации согласована с квантовой механикой. Это означает, что описание какого-либо явления в рамках теории гравитации не должно противоречить описанию этого же явления в рамках квантовой механики.

Исходя из принципа Маха, вблизи большой массы уменьшается неопределенность в движении частицы. А из этого, в свою очередь, следует, что вблизи большой массы траектория движения частицы будет искривлена. Поэтому в рамках новой теории гравитационное взаимодействие можно рассматривать как исключительно квантовый эффект.

Все гравитационные эксперименты, проведенные на Земле и в Солнечной системе, подтверждают не основные уравнения общей теории относительности и даже не уравнение Шварцшильда для одной точечной массы, а лишь приближенное уравнение для квадрата интервала в слабом гравитационном поле. Но это уравнение можно интерпретировать по-разному. Для однозначной интерпретации этого уравнения необходимо провести прямой эксперимент по измерению скорости времени в гравитационном поле. Для проведения такого эксперимента нужны высокоточные атомные часы с погрешностью менее чем 10^{-15} .

Общая теория относительности допускает существование кротовой норы, или червячного перехода или «червоточина», хотя для существования проходимой кротовой норы необходимо, чтобы она была заполнена экзотической материей с отрицательной плотностью энергии, создающей сильное гравитационное отталкивание и препятствующей схлопыванию норы. Решения

типа кротовых нор возникают в различных вариантах квантовой гравитации, хотя до полного исследования вопроса еще очень далеко. Механизм образования и существования этих структур описывается в зависимости от конкретной теории гравитации по-разному – отсюда и исходят проблемы существования червоточин в нашей Вселенной.

Структура монополя реактора и сети Вселенной

Пространство и время являются формами существования материи, следовательно, они обладают энергией и преобразуют ее. Энергия гравитационного поля дает возможности использовать искривление пространства для организации межгалактических полетов космического аппарата.

Представляется, что гравитация является порождением взаимодействия монополей естественных реакторов. Новый подход к гравитационным взаимодействиям дает возможность определить структуру пространства Вселенной как сетевую. Траектория полета космического аппарата должна проходить по каналам такой сети, представляющим собой расширяющиеся пространства различной кривизны.

Поскольку функционирование естественных реакторов подобно работе ядерного реактора, рассмотрим первоначально структуру монополей ядерных реакторов, определяющих гравитационные взаимодействия.

Создание монополя ядерного реактора

В структуре монополя ядерного реактора можно выделить четыре составляющие: монополь черной дыры (первый уровень), монополь белой дыры (второй уровень), монополь сфер сжатия (третий уровень) и монополь сфер расширения (четвертый уровень). Эти монополи взаимосвязаны и порождаются ядерным реактором при его работе на четырех различных диапазонах частот, которые являются частотами электромагнитного управления ($\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3$). Для простоты изложения вместо эллипсоидов будем рассматривать пространственные сферы.

В [6] приведен вывод для этих частот следующих формул

$$\omega_i = \begin{cases} k \cdot \frac{1}{c}, & \text{если } i = 0, \\ k \cdot \frac{c^{i-1}}{\ln(c^i)}, & \text{если } i = 1, 2, 3 \end{cases}, \quad (1)$$

где k – константа, необходимая для согласования размерности в формуле; i – номер гармоники функции Бесселя.

В соответствии с (1) получены следующие значения

$$\begin{aligned} \omega_0 &= k \cdot \frac{1}{c} \approx 3,3 \cdot 10^{-9} c^{-1}, \\ \omega_1 &= k \cdot \frac{1}{\ln c} \approx 5 \cdot 10^{-2} c^{-1}, \\ \omega_2 &= k \cdot \frac{c}{\ln(c^2)} \approx 7,6 \cdot 10^6 c^{-1}, \\ \omega_3 &= k \cdot \frac{c^2}{\ln(c^3)} \approx 1,5 \cdot 10^{15} c^{-1}. \end{aligned}$$

Кроме того, для дальнейшего определения параметров монополя будем использовать полученное в [6] соотношение для энтропии реактора,

$$H = \frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\alpha^3}{2\pi},$$

где α – постоянная тонкой структуры, ω – частота излучения.

Формула (1) применима для реактора нулевой мощности с эквивалентной группой запаздывающих нейтронов. Рассмотрим влияние шестой группы запаздывающих нейтронов, а также наличие в составе топлива плутония.

В этом случае формулы расчета частот гармоник преобразуются к следующему виду

$$\omega'_i = \begin{cases} \left(\frac{\omega_{BP}}{\omega_{MP}} \right) \left(\frac{\beta_6}{F\beta} \right)^{-1} \omega_0, & \text{если } i = 0, \\ \left(\frac{\beta_6}{F\beta} \right)^{-1} \omega_1, & \text{если } i = 1, \\ \left(\frac{\beta_6}{F\beta} \right) \omega_i, & \text{если } i = 2, 3 \end{cases}, \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{\omega_{MP}} \cdot \frac{\beta_6}{\beta} \omega_2,$$

где ω_{BP} – частота внешнего электромагнитного воздействия, соотносимого по величине с частотой реликтового излучения; ω_{MP} – частота ядерного магнитного резонанса, которая зависит от исходного состояния реактора (структуры топлива) в момент появления внешнего электромагнитного воздействия; β и β_6 – доля соответственно всех запаздывающих нейтронов и нейтронов 6-й группы по отношению к полному числу нейтронов для ^{235}U .

Проведя несложные преобразования (2), получим

$$\omega'_0 = \frac{\omega_{BP} \omega_2}{\omega_{MP}^2} \omega_0,$$

$$\omega'_1 = \frac{\omega_2}{\omega_{MP}} \omega_1,$$

$$\omega'_2 = \omega_{MP},$$

$$\omega'_3 = \frac{\omega_{MP}}{\omega_2} \omega_3.$$

Последующий вывод [6] позволил получить частоту нулевой гармоники

$$\omega'_0 = \frac{\alpha^3}{2\pi} \frac{c}{\ln(c^2)}.$$

Частота нулевой гармоники при квантовании пространства реактора является постоянной и не зависит от величины внешнего воздействия.

Упрощенная формула расчета (без корректирующих коэффициентов) для первой и второй структур монополя коэффициента искривления пространства имеет вид

$$k_{Mi} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{1 + 10\beta' \omega_{Mi}} \right)^2}}, \quad (3)$$

где ω'_{Mi} – частота реактивности i -й гармоники; β' – доля запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейтронов для ^{239}Pu .

Кривизну пространства структуры первого уровня определяет частота $\omega_{M1} = \omega'_0 = 0,48 \text{ Гц}$, второго уровня $\omega_{M2} = \omega'_1 = 1,1 \text{ Гц}$.

Первая структура является гиперболоидом, ограниченным сферой радиусом

$$R_1 = \frac{ck_1}{\omega_{MP}}.$$

Вторая структура – тороид, вписанный в сферу радиусом

$$R_2 = \frac{ck_2}{\omega_{MP}} \quad (R_1 > R_2).$$

Третья структура представляет собой множество сферических слоев, находящихся друг от друга на расстоянии R_1 . Радиус первой сферы равен R_1 , следовательно, первого слоя

$$h_{3,1} = \frac{c}{2\omega'_2}.$$

Ширина слоя уменьшается по мере удаления сферы от центра реактора и стремится к величине

$$h_{3,n} = \frac{c}{2\omega'_3}.$$

Кроме того уменьшается и коэффициент ис-

кривления пространства j -го слоя (сферы) в соответствии с формулой

$$h_{3,j+1} = h_{3,1} \frac{k_{3,j+1}}{k_{3,j}},$$

$$k_{3,j} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{1 + 10\beta' \omega_{M3,j}} \right)^2}},$$

$$\omega_{M3,j} = \omega_{M3} + (j-1)\Delta\omega,$$

$$\Delta\omega = \omega_{M2} - \omega_{M1}.$$

Причем $\omega_{M3} = \omega_{M2} + (\omega_{M2} - \omega_{M1}) = 1,72 \text{ Гц}$.

Четвертая структура формируется аналогично третьей, но радиус ее первой сферы определяется формулой

$$h_{4,1} = \frac{c}{2\omega_2} \omega_3,$$

а частоты соотношением.

$$\omega_{M4,l} = \omega_{M3,n} + (l-1)\Delta\omega'',$$

$$\Delta\omega'' = \omega_{M3,n} - \omega_{M3}.$$

Наименьшая ширина слоя

$$h_{4,m} = \frac{c}{\omega_\gamma},$$

где ω_γ – частота γ -излучения.

Поскольку приведенные расчеты выполнены для некоего эталонного реактора, необходимо ввести коэффициент расстояния (масштаб)

$$z = \frac{M_0}{m_0},$$

где M_0 и m_0 – масса топлива объекта и эталона соответственно.

Состав топлива влияет на коэффициент искривления пространства. Минимальное содержание плутония соответствует $\omega'_M = 0,48 \text{ Гц}$ и составляет 21%. Величина частоты создания черной дыры ядерного реактора возрастает при увеличении содержания плутония в топливе.

Минимальное содержание плутония соответствует $\omega''_M = 1,1 \text{ Гц}$ и составляет 18%. Величина частоты создания голой сингулярности ядерного реактора уменьшается при увеличении содержания плутония в топливе.

В формулу (3) введем коэффициент изменения количества плутония

$$k_R = k_{Pu_min} / k_{Pu}, \quad (4)$$

где k_{Pu_min} , k_{Pu} – минимальная возможная доля плутония в топливе для создания черной дыры или голой сингулярности в соответствии с рассматриваемым типом монополя и текущая

доля плутония в составе топлива.

С учетом (4) формула (3) примет вид

$$k_{Mi} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{1 + 10k_R\beta'\omega_{Mi}} \right)^2}}.$$

Частотный диапазон создания монополей любого типа ограничивается частотами нулевой и первой гармоник реактивности.

При доле плутония в ядерном топливе 24,4% возможен процесс перетекания энергии с одного реактора на другой с меньшим содержанием плутония в топливе[6]. Частота процесса перетекания энергии составляет 54Гц.

Образование переходов в искривленных пространствах Вселенной

Монополи космических объектов Вселенной строятся аналогично монополям ядерных реакторов с учетом особенностей материала, выступающего в качестве топлива естественных реакторов, и больших масс объектов.

Следовательно, монополярная структура любого космического объекта (планеты, звезды, галактики) включает четыре составляющие: черную (первый уровень) и белую (второй уровень) дыры; сферы сжатия (третий уровень), определяющие слабое гравитационное взаимодействие; сферы расширения (четвертый уровень), порождающие сильное гравитационное взаимодействие.

Пересечение сферических слоев третьего монополей уровня различных космических объектов создают энергетическую сеть Вселенной, «сшивая» пространство Вселенной.

Сферические слои сжатия при пересечении и выполнении условия, определяющего соотношение толщин h' и h'' , а также частот ω' и ω'' слоев сфер третьих структур монополей первого и второго объекта соответственно,

$$h'\omega'' = h''\omega', \quad (5)$$

образуют туннельный переход из одного искривленного пространства в другое (рис. 1).

Такие туннельные переходы не могут быть использованы для полетов космических аппаратов (КА), поскольку их создающие сферические пространства являются областями сжатия, то есть время в этих пространствах относительно исходного словно замирает. При этом находящимся на КА кажется, что они летят с огромной скоростью. Это происходит за счет роста ускорения.



Рис. 1. Создание туннельного перехода.

Наоборот, сферические слои расширения монополей космических объектов при пересечении и выполнении условия (5) образуют транспортную сеть Вселенной и аккумулируют ее кинетическую энергию.

В местах таких пересечения образуется разрыв расширяющихся пространств, и появляется возможность перехода из исходного пространства в искривленные. Образуется нечто подобное воронке (рис.2).

Именно пространственные воронки могут быть использованы для межгалактических полетов КА.



Рис.2. Пространственная воронка.

Необходимо помнить, что сети Вселенной не являются стационарными, так как все космические объекты находятся в движении. Поэтому для построения траектории полета КА надо определять не только места воронок и туннелей, но и моменты времени их появления. Следует учитывать, что попадание в места образования туннелей замедлит полет КА. Кроме того, за счет движения космических объектов в реальности форма монополей и их структур является эллипсоидальной, а не сферической.

Таким образом, задача расчета траектории межгалактического полета КА сводится не

только к знанию топологии Вселенной, параметров космических объектов и их траекторий, но и в создании мощного вычислительного комплекса, позволяющего в режиме реального времени определять координаты КА. Это потребует развитие систем искусственного интеллекта.

Заключение

Созданная теория пространственно-временных монополей реакторов определила возможности описания природы гравитационного поля с иных позиций, а также рассмотрения кротовых нор как результата взаимодействия монополей различных космических объектов.

В статье предложен новый подход к определению траекторий межгалактических полетов космических аппаратов, позволяющий использовать пространственные сетевые структуры, создаваемые монополями звезд и галактик.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б. Новиков И.Д. Строеие и эволюция Вселенной. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. – 736 с.
2. Рис М., Руффини Р., Уилер Дж. Черные дыры, гравитационные волны и космология. – М.: Мир, 1977. – 376 с.
3. Пенроуз Р. Циклы времени. Новый взгляд на эволюцию Вселенной – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 333 с.
4. Зельдович Я.Б., Блиинников С.И., Шакура Н.И. Физические основы строения и эволюции звезд. – М.: МГУ, 1981. – 150 с.
5. Зельдович Я.Б. Новиков И.Д. Теория тяготения и эволюция звезд. – М.: Наука, 1971. – 484 с.
6. Качур С.А. Теория пространственно-временных монополей реакторов – Севастополь: РИБЕСТ, 2019. – 364с.

References

1. Zel'derovich Ya.B., Novikov I.D. *Stroenie i evolyuciya Vselennoj* [Structure and evolution of Universe]. Moscow, Nauka, 1975. 736p.
2. Rees M., Ruffini R., Wheeler J. *Chyornnye dyry, gravitacionnye volny i kosmologiya* [Black holes, gravitational waves and cosmology]. Moscow, Mir, 1977. 376p.
3. Penrouse R. *Cikly vremeni. Novyj vzglyad na evolyuciyu Vselennoj* [Cycles of time. New look on evolution of Universe]. Moscow, BINOM, 2014. 333p.
4. Zel'derovich Ya.B., Blinnikov S.I., Shakura N.I. *Fizicheskie osnovy stroeniya i evolyuciya zvyozd* [Theory of gravitation and evolution of stars]. Moscow, MGU, 1981. 150p.
5. Zel'derovich Ya.B., Novikov I.D. *Teoriya tyagoteniya i evolyuciya zvyozd* [Theory of gravitation

and evolution of stars]. Moscow, Nauka, 1971. 484p.

6. Kachur S.A. *Teoriya prostranstvenno-vremennyh monopoliej reaktorov* [Theory of space-time monopolies of reactors]. Sevastopol, RIBEST, 2019, 364p.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.92

**Математическое моделирование передачи электроэнергии
от удаленных ветровых и волновых электростанций**

Л.Н. Канов, С.А. Конева, А.К. Пронина

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, lkanov48@mail.ru

Статья поступила 20.06.2023 г.; после доработки 21.06.2023 г.

Аннотация

Представлена возможность численного моделирования системы передачи электроэнергии через длинные кабели от группы удаленных волновых и ветровых электростанций, состоящей из синхронных генераторов, находящихся в индивидуальных погодных условиях. Построена математическая модель совокупности синхронных генераторов, трансформаторов и береговой сети. Показано, что для повышения точности расчетов кабели целесообразно представлять линиями с распределенными по длине параметрами. Описан алгоритм составления уравнений модели, приведены примеры расчета типичных режимов.

Ключевые слова: синхронный генератор, трансформатор, кабельная линия, математическое моделирование, напряжение, ток, активная и реактивная мощность, энергосистема.

**Mathematical design of passing to electric power
from remote wind and wave power-stations**

L.N. Kanov, S.A. Koneva, A.K. Pronina

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia, lkanov48@mail.ru

The article acted 20.06.2023 y.; after a revision 21.06.2023 y.

Abstract

Possibility of numeral design of the system of passing to electric power is presented through long cables from the group of remote wave and wind power-stations consisting of synchronous generators, being in individual weather terms. The mathematical model of aggregate of synchronous generators, transformers and waterside network is built. It is rotined that for the increase of exactness of calculations it is expedient to present cables lines with the parameters up-diffused on length. The algorithm of drafting of equalizations of model is described, the examples of calculation of the typical modes are resulted.

Keywords: synchronous generator, transformer, cable bus, mathematical design, tension, current, active and reactive power, energy system.

Введение

В крупных шахтных и портовых предприятиях, оффшорных ветро и волновых электростанциях электрические системы представляют

сложные распределенные совокупности генераторов и трансформаторов, соединенных кабельными сетями. Рост мощности агрегатов и наличие длинных кабельных линий требует учета взаимных влияний элементов электроэнергети-

ческих систем [1, 2]. Анализ режимов в подобных системах выполняется по математическим моделям машин, связанных кабелями, в которых учитываются эквивалентные сопротивления и индуктивности жил кабелей [3 – 5]. Актуальной к настоящему времени является задача анализа электроэнергетических режимов с учетом длин и всех параметров кабелей, рассматриваемых как электрические цепи с распределенными параметрами.

В современной электроэнергетике применяется блочный, модульный принцип построения схем электростанций, когда несколько генераторов соединяются с трансформатором и образуют энергоблок. Выдача мощности в энергосистему осуществляется через один сетевой трансформатор и через одну кабельную линию связи с энергосистемой. Параметры сетевого повышающего трансформатора зависят от напряжения повышающих трансформаторов на генераторах.

Целью статьи является построение методики расчета и анализ эксплуатационных режимов распределенных электроэнергетических систем генераторов, трансформаторов, длинных кабельных линий с учетом изменения параметров по длине кабелей. Для достижения этой цели построена математическая модель электроснабжения, и выполнен анализ характерных эксплуатационных режимов.

Математическая модель схемы соединений электростанции

Типичная схема соединений удаленной электростанции с электрической сетью показана на рис. 1.

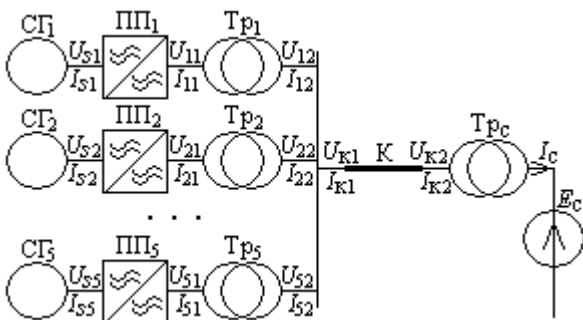


Рис. 1. Упрощенная схема соединений оффшорной электростанции

Блок генераторов содержит пять синхронных волновых или ветрогенераторов СГ1 – СГ5. Так как подобные генераторы в силу индивидуальных ветровых условий имеют непостоянную частоту вращения, то передача мощности в сеть

осуществляется через статические преобразователи частоты ПП1 – ПП5. Через повышающие трансформаторы Тр1 – Тр5 напряжения генераторов попадают на сборную шину и с неё на вход кабельной линии. В конце кабеля через сетевой повышающий трансформатор Трс мощность передается в сеть с напряжением E_c и током I_c .

Ограничимся анализом случая неявнополюсных генераторов без учета демпфирующих контуров и безинерционных полупроводниковых преобразователей, преобразующих напряжения генераторов непостоянной частоты в стабильное напряжение, поступающее на повышающие трансформаторы.

Полагаем далее, что удельные параметры кабеля являются известными функциями расстояния x по его длине:

$$r_0(x), g_0(x), L_0(x), C_0(x).$$

В этих условиях составим математическую модель схемы электростанции. В соответствии с [4, 5] представим неявнополюсные синхронные генераторы комплексными уравнениями

$$\dot{U}_{si} + (r_{si} + j\omega L_{si})\dot{I}_{si} = -j\omega M_{fi} I_{fi} e^{j\vartheta_i(t)}, i = 1...5, \quad (2)$$

где $r_{si} + j\omega L_{si} = \underline{Z}_i$ – комплексные сопротивления фаз обмоток статоров; M_{fi}, I_{fi} – коэффициенты взаимной индукции и токи возбуждения генераторов; $\vartheta_i(t)$ – начальные фазы ЭДС генераторов.

Комплексные уравнения на фазу повышающих трансформаторов с обмотками w_{1i}, w_{2i} представим в виде системы

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{i1} &= (r_{i1} + j\omega L_{i1})\dot{I}_{i1} - j\omega M_{i12}\dot{I}_{i2}; \\ -\dot{U}_{i2} &= (r_{i2} + j\omega L_{i2})\dot{I}_{i2} - j\omega M_{i12}\dot{I}_{i1} \end{aligned} \right\}, i = 1...5, \quad (2)$$

где $r_1 + j\omega L_1, r_2 + j\omega L_2$ – комплексные сопротивления первичной и вторичной обмоток;

$j\omega M_{12}\dot{I}_1, j\omega M_{12}\dot{I}_2$ – напряжения взаимной индукции между обмотками; $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_2$ – входные и выходные напряжения и токи трансформаторов.

Для первичных обмоток трансформаторов с учетом ЭДС и сопротивлений генераторов справедливы первые уравнения в (2) в виде

$$\dot{E}_i = \dot{I}_{i1} \underline{Z}_i + (r_{i1} + j\omega L_{i1})\dot{I}_{i1} - j\omega M_{i12}\dot{I}_{i2}. \quad (3)$$

На сборной шине в начале кабеля выполняются следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{12} &= \dot{U}_{22} = \dots = \dot{U}_{52} = \dot{U}_{каб1}; \\ \dot{I}_{12} + \dot{I}_{22} + \dots + \dot{I}_{52} &= \dot{I}_{каб1}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В конце кабеля на обмотках сетевого трансформатора справедливы уравнения

$$\left. \begin{aligned} U_{T1} &= \dot{U}_{каб2} = (r_{T1} + j\omega L_{T1})\dot{I}_{T1} - j\omega M_{T12}\dot{I}_{T2}; \\ -\dot{U}_{T2} &= -\dot{E}_c = (r_{T2} + j\omega L_{T2})\dot{I}_{T2} - j\omega M_{T12}\dot{I}_{T1}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\dot{I}_{T1} = \dot{I}_{каб2}$; $\dot{I}_{T2} = \dot{I}_c$.

Выразим токи первичных обмоток трансформаторов согласно (3)

$$\dot{I}_{i1} = \frac{\dot{E}_i + j\omega M_{i12}\dot{I}_{i2}}{\underline{Z}_i + r_{i1} + j\omega L_{i1}}; \quad i=1...5. \quad (6)$$

Тогда уравнения на вторичных обмотках трансформаторов по (2) и (6) принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_{i2} + (r_{i1} + j\omega L_{i1})\dot{I}_{i2} - ... \\ ... - \frac{j\omega M_{i12} \cdot (\dot{E}_i + j\omega M_{i12}\dot{I}_{i2})}{\underline{Z}_i + r_{i1} + j\omega L_{i1}} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

при $i=1...5$.

Принятое математическое описание кабельной линии

Уравнения кабельной линии с распределенными параметрами имеют вид

$$\frac{d\dot{U}}{dx} = -\underline{Z}_0(x)\dot{I}; \quad \frac{d\dot{I}}{dx} = -\underline{Y}_0(x)\dot{U},$$

где $\underline{Z}_0(x) = r_0(x) + j\omega L_0(x)$ и

$\underline{Y}_0(x) = g_0(x) + j\omega C_0(x)$ – комплексные параметры кабеля.

К настоящему времени не найдено аналитического решения этих уравнений [6 – 9]. Поэтому разделим кабель по длине на n однородных участков одинаковой длины l_j и примем на каждом из них индивидуальные постоянные значения параметров: $r_{j0}(x) = r_{j0}$; $L_{j0}(x) = L_{j0}$;

$g_{j0}(x) = g_{j0}$; $C_{j0}(x) = C_{j0}$.

Теперь для каждого участка кабельной линии имеем решения уравнений для комплексного тока и напряжения [7]

$$\dot{U}_j(x) = \underline{A}_{j1}e^{-\gamma_j x} + \underline{A}_{j2}e^{\gamma_j x};$$

$$\dot{I}_j(x) = \frac{\underline{A}_{j1}e^{-\gamma_j x} - \underline{A}_{j2}e^{\gamma_j x}}{\underline{Z}_{jB}}, \quad j=1, 2...n,$$

где $\gamma_j = \sqrt{(r_{j0} + j\omega L_{j0})(g_{j0} + j\omega C_{j0})}$ – коэффициент распространения:

$$\underline{Z}_{jB} = \sqrt{\frac{r_{j0} + j\omega L_{j0}}{g_{j0} + j\omega C_{j0}}} -$$

– волновое сопротивление j -го участка;

$\underline{A}_{j1}$, $\underline{A}_{j2}$ – постоянные интегрирования. Эти постоянные необходимо определять по граничным условиям в точках соединения однородных участков кабеля и по условиям в начале и конце кабеля. Так, в точке соединения j и $j+1$ участков имеет место равенство напряжений и токов в конце j и в начале $j+1$ участка

$$\left. \begin{aligned} \underline{A}_{j1}e^{-\gamma_j l_j} + \underline{A}_{j2}e^{\gamma_j l_j} &= \underline{A}_{j+1,1} + \underline{A}_{j+1,2}; \\ \frac{\underline{A}_{j1}e^{-\gamma_j l_j} - \underline{A}_{j2}e^{\gamma_j l_j}}{\underline{Z}_{jB}} &= \frac{\underline{A}_{j+1,1} - \underline{A}_{j+1,2}}{\underline{Z}_{j+1,B}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В начале первого участка кабеля из (7) получаем

$$\dot{I}_{i2} = \frac{\frac{j\omega M_{i12}\dot{E}_i}{\underline{Z}_i + r_{i1} + j\omega L_{i1}} - \underline{A}_{i1} - \underline{A}_{i2}}{r_{i2} + j\omega L_{i2} + \frac{(\omega M_{i12})^2}{\underline{Z}_i + r_{i1} + j\omega L_{i1}}}; \quad i=1, 2...5.$$

С учетом второго уравнения (4) получаем уравнение для пары постоянных $\underline{A}_{i1}$, $\underline{A}_{i2}$ в начале первого участка кабеля

$$\sum_{i=1}^5 \frac{\frac{j\omega M_{i12}\dot{E}_i}{\underline{Z}_i + r_{i1} + j\omega L_{i1}} - \underline{A}_{i1} - \underline{A}_{i2}}{r_{i2} + j\omega L_{i2} + \frac{(\omega M_{i12})^2}{\underline{Z}_i + r_{i1} + j\omega L_{i1}}} = \frac{\underline{A}_{i1} - \underline{A}_{i2}}{\underline{Z}_{iB}}. \quad (9)$$

Из первой формулы (5) получаем для конца кабеля (участок n)

$$\begin{aligned} -(\underline{A}_{n1}e^{-\gamma_n l_n} + \underline{A}_{n2}e^{\gamma_n l_n}) + (r_{T1} + j\omega L_{T1}) \times ... \\ ... \times \frac{\underline{A}_{n1}e^{-\gamma_n l_n} - \underline{A}_{n2}e^{\gamma_n l_n}}{\underline{Z}_{nB}} = j\omega M_{T12}\dot{I}_c. \end{aligned}$$

Из второй формулы (5) имеем еще одно уравнение

$$\begin{aligned} -\dot{E}_c + j\omega M_{T12} \frac{\underline{A}_{n1}e^{-\gamma_n l_n} - \underline{A}_{n2}e^{\gamma_n l_n}}{\underline{Z}_{nB}} = \\ = (r_{T2} + j\omega L_{T1})\dot{I}_c. \end{aligned}$$

Выражая из двух последних уравнений $\dot{I}_c$ и приравнивая, получаем уравнение (10) для $\underline{A}_{n1}$, $\underline{A}_{n2}$:

$$\begin{aligned} \underline{A}_{n1}e^{-\gamma_n l_n} \left\{ 1 - \frac{\underline{Z}_{T1}}{\underline{Z}_{nB}} - \frac{(\omega M_{T12})^2}{\underline{Z}_{nB}\underline{Z}_{T2}} \right\} = \\ = -\underline{A}_{n2}e^{\gamma_n l_n} \left\{ 1 + \frac{\underline{Z}_{T1}}{\underline{Z}_{nB}} + \frac{(\omega M_{T12})^2}{\underline{Z}_{nB}\underline{Z}_{T2}} \right\} + \frac{j\omega M_{T12}\dot{E}_c}{\underline{Z}_{T2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Определение постоянных интегрирования на участках кабеля

Из уравнения (9) получаем

$$\underline{A}_{11}(\underline{A}_{12}) = \underline{Eg1} - \underline{Eg2} \cdot \underline{A}_{12}, \quad (11)$$

где $\underline{Eg1}$, $\underline{Eg2}$ – выражения, получающиеся в процессе преобразований:

$$\underline{Eg1} = \frac{\underline{ChE}}{\underline{Znm} + \underline{Z}_{1B}^{-1}}; \quad \underline{Eg2} = \frac{\underline{Znm} - \underline{Z}_{1B}^{-1}}{\underline{Znm} + \underline{Z}_{1B}^{-1}},$$

в которых обозначены

$$\underline{ChE} = \sum_{i=1}^5 \frac{\frac{j\omega M_{i12} \dot{E}_i}{\underline{Z}_i + r_{i1} + j\omega L_{i1}} - \underline{A}_{11} - \underline{A}_{12}}{r_{i2} + j\omega L_{i2} + \frac{(\omega M_{i12})^2}{\underline{Z}_i + r_{i1} + j\omega L_{i1}}};$$

$$\underline{Znm} = \sum_{i=1}^5 \left[r_{i2} + j\omega L_{i2} + \frac{(\omega M_{i12})^2}{\underline{Z}_i + r_{i1} + j\omega L_{i1}} \right]^{-1}.$$

В точке соединения первого и второго участков кабеля из уравнения (8) получаем при $j = 1$ с подстановкой из (11)

$$\underline{A}_{11}(\underline{A}_{12})e^{-\gamma_{1l}} + \underline{A}_{12}e^{\gamma_{1l}} = \underline{A}_{21} + \underline{A}_{22};$$

$$\frac{\underline{A}_{11}(\underline{A}_{12})e^{-\gamma_{1l}} - \underline{A}_{12}e^{\gamma_{1l}}}{\underline{Z}_{1B}} = \frac{\underline{A}_{21} - \underline{A}_{22}}{\underline{Z}_{2B}}.$$

Отсюда выражаем постоянные $\underline{A}_{21}$, $\underline{A}_{22}$ второго участка кабеля через постоянные $\underline{A}_{11}$, $\underline{A}_{12}$ первого участка

$$\underline{A}_{21}(\underline{A}_{12}) = 0,5 \left[e^{-\gamma_{1l}} \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_{2B}}{\underline{Z}_{1B}} \right) \cdot \underline{A}_{11}(\underline{A}_{12}) + e^{\gamma_{1l}} \cdot \left(1 - \frac{\underline{Z}_{2B}}{\underline{Z}_{1B}} \right) \cdot \underline{A}_{12} \right]; \quad (12)$$

$$\underline{A}_{22}(\underline{A}_{12}) = 0,5 \left[e^{-\gamma_{1l}} \cdot \left(1 - \frac{\underline{Z}_{2B}}{\underline{Z}_{1B}} \right) \cdot \underline{A}_{11}(\underline{A}_{12}) + e^{\gamma_{1l}} \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_{2B}}{\underline{Z}_{1B}} \right) \cdot \underline{A}_{12} \right].$$

Далее, аналогично, в точке соединения j и $j+1$ участков ($j = 2, 3...n-1$)

$$\underline{A}_{j+1,1}(\underline{A}_{12}) = 0,5 \left[e^{-\gamma_{jl}} \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_{j+1,B}}{\underline{Z}_{jB}} \right) \cdot \underline{A}_{j1}(\underline{A}_{12}) + e^{\gamma_{jl}} \cdot \left(1 - \frac{\underline{Z}_{j+1,B}}{\underline{Z}_{jB}} \right) \cdot \underline{A}_{j2}(\underline{A}_{12}) \right]; \quad (13)$$

$$\underline{A}_{j+1,2}(\underline{A}_{12}) = 0,5 \left[e^{-\gamma_{jl}} \cdot \left(1 - \frac{\underline{Z}_{j+1,B}}{\underline{Z}_{jB}} \right) \cdot \underline{A}_{j1}(\underline{A}_{12}) + e^{\gamma_{jl}} \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_{j+1,B}}{\underline{Z}_{jB}} \right) \cdot \underline{A}_{j2}(\underline{A}_{12}) \right].$$

Для конца кабеля (конец последнего участка) выражение (10) дает связь между $\underline{A}_{n1}$, $\underline{A}_{n2}$. Подставляя в (10) $\underline{A}_{j+1,1}(\underline{A}_{12})$, $\underline{A}_{j+1,2}(\underline{A}_{12})$ при $j = n-1$, из (13) получаем выражение для $\underline{A}_{12}$ и, следовательно, из (12), (13) получаем все значения постоянных интегрирования и всех параметров режима.

Результаты моделирования режимов электростанции

Расчет выполнялся в среде *MathCad* при следующих значениях параметров генераторов: $r_s = 0,02 \text{ Ом}$; $L_s = 0,0035 \text{ Гн}$; $L_f = 0,0446 \text{ Гн}$; $I_f = 47 \text{ А}$; $U_s = 660 \text{ В}$. Частота напряжения генераторов соответствует промышленной, но напряжения могут быть смещены по фазе в силу индивидуальных волновых или ветровых условий. Эти смещения в формулах выходных напряжений генераторов приняты следующими: $\vartheta_1 = -1,25 + 0,15 \sin 3t$; $\vartheta_2 = -1,25 + 0,12 \sin 2t$; $\vartheta_3 = -1,25 + 0,1 \sin t$; $\vartheta_4 = -1,25 + 0,1 \sin 0,5t$; $\vartheta_5 = -1,25$. Полагаем также, что первый генератор теряет напряжение на интервале от 1,5 до 3 с, а пятый генератор включается в работу в момент 2,5 с от начала наблюдения.

Активные сопротивления обмоток всех трансформаторов $r_1 = 0,03 \text{ Ом}$; $r_2 = 0,05 \text{ Ом}$; индуктивности $L_1 = 0,0334 \text{ Гн}$; $L_2 = 0,1 \text{ Гн}$; коэффициент взаимной индукции $M_{12} = 0,0578 \text{ Гн}$; коэффициент трансформации $n = \frac{1}{\sqrt{3}}$.

Напряжение сети полагаем $U_c = -j380 \text{ В}$.

Длину кабеля разделим на 10 интервалов: $n = 10$. Удельные значения индуктивности и емкости в основном определяются конструктивными особенностями кабелей и мало зависят от внешних условий. Полагаем их постоянными: $L_0 = 3,18 \text{ мкГн / м}$; $C_0 = 0,44 \text{ мкФ / м}$. Графики зависимостей удельных сопротивления и проводимости по длине кабеля приведены на рис.2, где учтены возможные изменения этих параметров

от температуры и влажности окружающей среды.

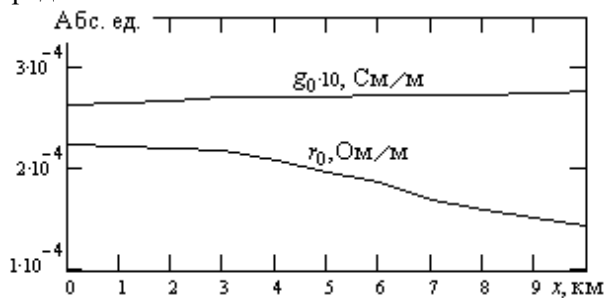


Рис.2. Принятая зависимость удельных параметров линии по её длине

На рис.3 показаны зависимости от времени параметров режима сетевого трансформатора и генератора СГ5.

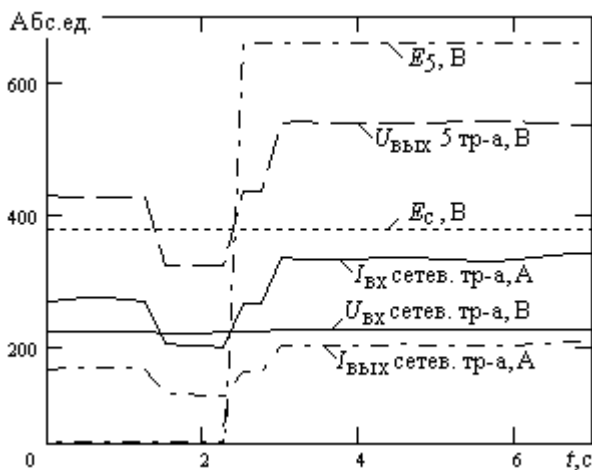


Рис.3. Зависимость параметров режима сетевого трансформатора от времени

Рисунок показывает, что включения и выключения генераторов СГ1 и СГ5 существенно влияют на режим сетевого трансформатора: ток, передаваемый в сеть, имеет провал на интервале, когда оба этих генератора теряют напряжение. Кроме того, на интервале наблюдения отслеживаются колебания напряжения на общей шине генераторов вследствие их рассогласования по фазе. Напряжение на вторичной обмотке сетевого трансформатора поддерживается сетью на неизменном уровне.

На рис.4 показаны графики выходных токов трансформаторов, а также токи на входе и выходе кабеля. Вследствие рассогласования фаз генераторов и их включения и отключения выходные токи трансформаторов испытывают существенные колебания в пределах от 50 до 250 А. Однако колебания токов кабеля при этом незначительны и обусловлены лишь переключениями режимов генераторов 1 и 5.

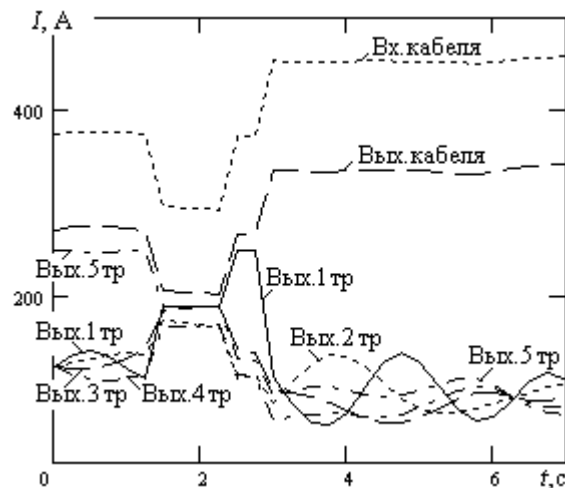


Рис.4. Зависимость параметров токов трансформаторов и кабеля от времени

Интенсивные колебания токов генераторов обуславливают активную динамику вырабатываемых ими мощностей, показанную на рис.5.

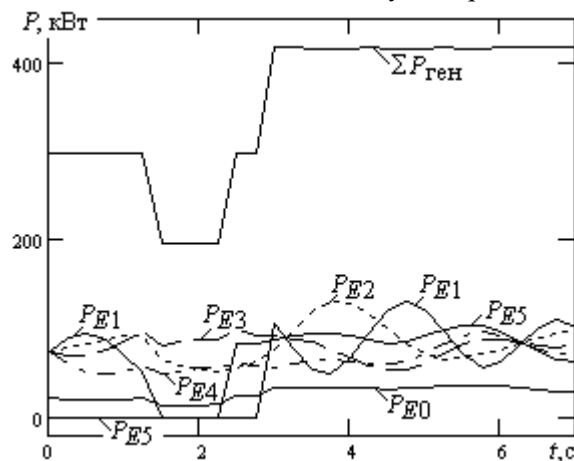
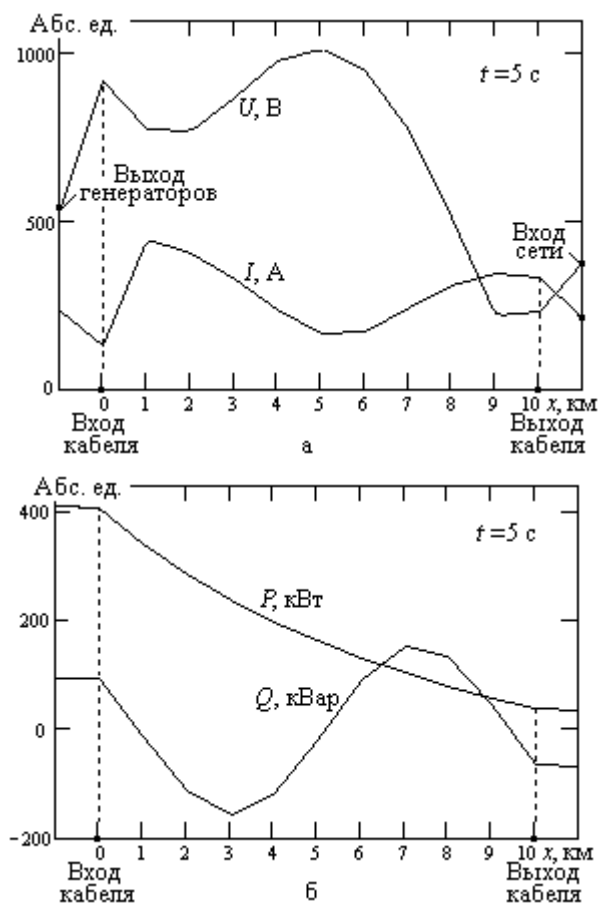


Рис.5. Зависимость активных мощностей, вырабатываемых генераторами от времени

Рисунок показывает, что, несмотря на значительные колебания активных мощностей, вырабатываемых генераторами, суммарная активная мощность, передаваемая в сеть, испытывает только небольшие колебания. Из расчета также следует, что большая часть активной мощности теряется в кабеле. Это объясняется выбором удельных параметров кабеля, в частности, продольного сопротивления и поперечной проводимости.

Это же подтверждается картиной распределения напряжения, тока, активной и реактивной мощностей по длине кабеля в момент времени через 5 с от начала наблюдения, показанной на рис.6. Распределение напряжения и тока вдоль кабеля имеет ярко выраженный волновой характер со значительными амплитудами стоячих

волн, рис.6,а. Подобные же колебания имеет распределение реактивной мощности, рис.6,б, в то время, как график распределения активной мощности имеет монотонный убывающий характер.



Для сокращения потерь мощности следует выбирать кабель с более низкими значениями удельных сопротивления и проводимости, а также с повышенным запасом прочности по напряжению.

Аналогично можно исследовать и другие режимы распределенные системы передачи электроэнергии.

Заключение

В статье показано, что существует принципиальная возможность исследования режимов работы группы волновых и ветрогенераторов, находящихся в индивидуальных природных условиях и передающих энергию в сеть через кабели. Вследствие возможного рассогласования фаз напряжения генераторов в кабелях появляются стоячие волны напряжения и тока. Для снижения потерь мощности в кабеле следует выбирать кабели с меньшими продольными параметрами сопротивления и проводимости. Однако

при этом вероятность увеличения амплитуд стоячих волн напряжения и тока возрастает.

Перспективной представляется задача построения алгоритмов оптимального управления подобными системами на основе статических полупроводниковых преобразователей.

Список литературы

1. Олейников А.М. Особенности математического моделирования электрической энергии от ветро-электростанций в оффшорных зонах / А.М.Олейников, Л.Н.Канов // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Системы контроля окружающей среды – 2022». – Севастополь, изд-во ИПТС, 2022. – С. 43.
2. Бурмакин О.А. Моделирование судовой электростанции со встроенной сетью постоянного тока в среде MATLAB / О.А.Бурмакин, В.В.Гуляев, Ю.С.Малышев, С.В.Попов. – Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 75-84. DOI: 10.46960/2658-6754_2021 – 3 – 75.
3. Герман Л.А. Уточненный метод расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока / Л.А.Герман, И.П.Карпов // – Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2. С. 15-25. DOI: 10.46960/2658-6754_2021 – 2 – 15.
4. Канов Л.Н. Расчет динамики системы распределенного асинхронного электропривода / Энергетические установки и технологии: научный журнал. Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2022. – Т.8. – №3. – С.47-54.
5. Канов Л.Н. Анализ эксплуатационных режимов систем электроснабжения с распределенной генерацией и потреблением / Л.Н.Канов, С.А.Конева, А.К.Пронина, Е.А.Ходак // Энергетические установки и технологии: научный журнал. Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2023. – Т.9. – №1. – С.128-137.
6. Электрические системы. Электрические сети / В.А.Веников, А.А.Глазунов, Л.А.Жуков и др. М.: Изд-во «Высшая школа», 1998. 511 с.
7. Еругин Н.П. Книга для чтения по общему курсу дифференциальных уравнений. – Минск: изд-во «Наука и техника», 1972. – 664 с.
8. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. – М.: изд-во «Энергоатомиздат», 1990. – 248 с.
9. Рыжов Ю.Г. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.

References

1. Oleynikov A.M., Kanov L.N. *Osobennosti matematicheskogo modelirovaniua peredachi elektricheskoy energii ot vetroelektrostantsii v off-shornykh zonakh* [Features of mathematical design of passing to electric energy from vindelektrosta-

- tions in offshore areas] Theses of lectures of the International Siemens-practic conference "Systems checking of environment – 2022». – Sevastopol, IPTS, 2022. – P. 43.
2. Burmakin O.F., Gulyaev V.V., Malyshev Y.U., Popov S.V. *Modelirovanie sudovoi elektrostantsii so vstroennoi set'yu postoyannogo toka v srede MATLAB* [Design of ship power-station with the built-in network of direct-current in the environment of MATLAB]. Intellectual electrical engineering. – 2021. No. 1. PP. 75-84. DOI: 10.46960/2658-6754_2021 – 3 – 75.
 3. German L.A., Karpov I.P. *Utochnennyi metod rascheta tokov korotkogo замыкания v tyagovoi seti peremennogo toka* [The specified method of calculation of currents of short circuit is in the hauling network of alternating current]. Intellectual electrical engineering. – 2021. No. 2. PP. 15-25. DOI: 10.46960/2658-6754_2021 – 2 – 15.
 4. Kanov L.N. *Raschet dinamiki sistemyraspredelenogo asinkhronnogo elektroprivoda* [Calculation of dynamics of the system of the up-diffused asynchronous electromechanic]. A scientific magazine is the «Power plants and technologies». 2022. T.8. No. 3. Publ. of FGAOU In the «Sevastopol state university». P.47 – 54. ISSN 2413 – 5526.
 5. Kanov L.N. *Analiz ekspluatatsionnykh rezhimovsistem elektroснабжения s raspredelennoi generatsiei i potrebleniem* [Analysis of the operating modes of the systems of electrosupply with the up-diffused generation and consumption] A scientific magazine is the «Power plants and technologies». 2023. T.9. No. 1. Publ. of FGAOU In the «Sevastopol state university». P.128 – 137. ISSN 2413 – 5526.
 6. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. *Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti*. M.: Izd-vo is «Higher school», 1998. 511 p.
 7. Erugin N.P. *Kniga dlya chteniya po obshchemu kursu differentsialnykh uravnenii* [Book for reading on the flat rate of differential equalizations]. Minsk: Izd-vo «Scitech», 1972. – 664 p.
 8. Kaganov Z.G. *Elektricheskie tsepi s raspredelennymi parametrami i tsepnye skhemy* [Electric chains with the up-diffused parameters and chain charts] – M.: Izd-vo of «Energoatomizdat», 1990. – 248 p/
 9. Ryzhov Yu.G. *Dalnie electropredachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Distant electricity transmissions of superhigh tension] – M.: the Publishing house of MEI, 2007. – 488.

УДК 620.92

Диагностика электрических систем переменного тока на основе комплексных нейронных сетей

Л.Н. Канов, Д.И. Алёшкин

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, lkanov48@mail.ru

Статья поступила 11.09.2023 г.; после доработки 13.09.2023 г.

Аннотация

Предложена концепция применения комплексных нейронных сетей для моделирования, анализа и диагностики электрических систем переменного тока на примере электродвигателя переменного тока. Достоинством является естественная увязка комплексных нейронных сетей с процедурами анализа электрических систем переменного тока, так как подобные системы всегда рассчитываются и исследуются с помощью комплексных чисел. Основные результаты продемонстрированы на примере двухслойной нейронной сети для отслеживания внутреннего тока электродвигателя переменного тока, недоступного для непосредственного измерения.

Ключевые слова: нейронная сеть, диагностика, асинхронный двигатель, обучение сети, ошибка настройки, комплексные числа, численный эксперимент

Diagnostics of the electric systems of alternating current on the basis of complex neuron networks

L.N. Kanov, D.I. Aleshkin

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia, lkanov48@mail.ru

The article acted 11.09.2023 y.; after a revision 13.09.2023 y.

Abstract

Conception of application of complex neuron networks is offered for a design, analysis and diagnostics of the electric systems of alternating current on the example of electric motor of alternating current. Dignity is the natural tying up of complex neuron networks with procedures of analysis of the electric systems of alternating current, because the similar systems always settle accounts and probed by imaginaries. Basic results are shown on the example of twolayer neuron network for watching of internal current of electric motor of alternating current, inaccessible for the direct measuring. Numeral experiments with the built neuron network show sufficient exactness of the offered method.

Keywords: neuron network, diagnostics, asynchronous engine, teaching of network, error of tuning, imaginaries, numeral experiment

Введение

Проблема диагностики технических устройств является чрезвычайно актуальной. Для решения этой задачи устанавливаются датчики, измеряющие параметры работы электрических устройств, такие как напряжение, ток, мощ-

ность, скорость вращения, нагрузка, температура нагрева, вибрация, шум и т.п. Задача диагностики состоит в том, чтобы по измеренным параметрам выявить возможные дефекты до разборки оборудования. Однако из-за больших объемов информации и сложности взаимосвязей между дефектами и измеряемыми параметрами

задача диагностики решается ненадежно и некачественно [1, 2].

Поставленная задача диагностики может быть эффективно решена с помощью нейронных сетей [3 - 5]. Целью работы является построение нейронной сети с использованием комплексных чисел специально для слежения за электрическими системами переменного тока, так как анализ подобных систем всегда выполняется с применением комплексных чисел [6]. Для достижения этой цели сформулированы и решены следующие задачи: – обоснование математической модели исследуемой электрической системы переменного тока, в качестве которой выбран электрический двигатель; – построение и выбор структуры и параметров комплексной нейронной сети и её обучающих массивов; – алгоритм настройки комплексной нейронной сети.

Принятая математическая модель электродвигателя переменного тока

Электрические двигатели переменного тока повсеместно применяются на промышленных предприятиях и часто работают в тяжелых условиях высокой температуры, влажности, запыленности. Вследствие этого в целях профилактики их приходится часто останавливать для технического обслуживания и диагностики. Особенно это актуально для электротранспорта, где от качественной работы электродвигателей зависит безопасность движения.

Поставим задачу оперативной оценки состояния электродвигателя по измеряемым текущим значениям параметров его работы, таких как напряжение, ток, нагрузка. Актуальной задачей является контроль нагрева электродвигателя, его обмоток. Эта задача усложняется тем, что обмотки располагаются на вращающемся роторе внутри закрытого корпуса двигателя, и непосредственное измерение температуры затруднено. Нагрев обмоток определяется величиной тока, протекающего по обмоткам ротора, и этот ток также трудно доступен для непосредственного измерения.

Нейронная сеть должна по легко измеряемым в текущем времени входному напряжению и величине механической нагрузки оценивать внутренние токи ротора, влияющие на нагрев двигателей. На основании этого оператор принимает решение об остановке электродвигателя и его профилактике, техническом обслуживании или ремонте.

Математическая модель электрического

двигателя переменного тока в стационарном режиме при сравнительно медленном изменении скорости вращения состоит из нелинейных уравнений [6]

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= (R_s + j\omega L_s)I_s + j\omega L_{ad}I_r; \\ 0 &= R_r I_r + j(\omega p - \Omega)(L_r I_r + L_{ad} I_s); \\ k_H \Omega &= L_{ad}(\text{Im } I_s \text{ Re } I_r - \text{Im } I_r \text{ Re } I_s). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Для рассматриваемого асинхронного короткозамкнутого электродвигателя введены следующие комплексные напряжения и токи статора и ротора:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U_{sd} + j \cdot U_{sq}; \quad \dot{I}_s = I_{sd} + j \cdot I_{sq}; \\ \dot{I}_r &= I_{rd} + j \cdot I_{rq}. \end{aligned}$$

В этих формулах обозначены: R_s, R_r, L_s, L_r – сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора; L_{ad} – коэффициент взаимной индукции между обмотками статора и ротора; Ω – угловая скорость вращения ротора, рад/сек; ω – круговая частота напряжения на двигателе, рад/сек; $M = L_{ad} \cdot (i_{aq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$ – вращающий момент двигателя, преодолевающий сопротивление нагрузки; $M_H = k_H \Omega$ – момент сопротивления нагрузки, принятый пропорциональным скорости вращения; $p = 3$ – конструктивный параметр двигателя.

Для примера выберем электрический двигатель небольшой мощности с параметрами [6]: сопротивления статора и ротора (Ом): $R_s = 0,27$; $R_r = 0,188$; индуктивности статора и ротора (Гн): $L_s = 0,052$; $L_r = 0,045$; взаимная индуктивность $L_{ad} = 0,044$ Гн; номинальная скорость вращения $\Omega = 102$ рад/сек; номинальный коэффициент нагрузки $k_H = 0,2$; номинальное напряжение $U_s = 380$ В.

Двухслойная нейронная сеть

Рассмотрим простую двухслойную нейронную сеть, рис.4, имеющую один выходной нейрон и три нейрона в скрытом слое [7 – 9]. Таким образом, настройке подлежат 9 комплексных коэффициентов:

$$k_{11}, k_{21}, k_{12}, k_{22}, k_{13}, k_{23}, w_1, w_2, w_3.$$

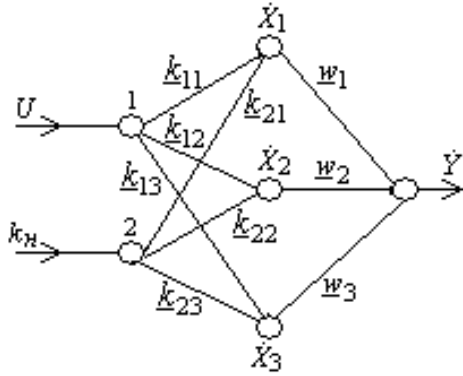


Рис.1. Двухслойная нейронная сеть

В соответствии с [10 – 11] выберем 9 обучающих образов с характерными сочетаниями входных сигналов U и k_H , табл.1. В этой таблице помещены точные комплексные значения вещественной и мнимой составляющих тока ротора $\dot{I}_r$ и его модуля $|\dot{I}_r|$ в относительных единицах, рассчитанные по уравнениям (1) (обучающий массив $\underline{d}$).

Таблица 1 Обучающий массив

Образ	U	k_H	$\text{Re}(\underline{d})$	$\text{Im}(\underline{d})$	$ \underline{d} $
1	0,185	0,1	-0,1587	0,0170	0,01587
2	0,185	0,15	-0,2106	0,0319	0,2130
3	0,185	0,2	-0,2634	0,0519	0,2685
4	0,19	0,2	-0,2564	0,0474	0,2608
5	0,19	0,15	-0,2050	0,0292	0,2071
6	0,19	0,1	-0,1541	0,0156	0,1549
7	0,18	0,1	-0,1622	0,0187	0,1633
8	0,18	0,15	-0,2105	0,0345	0,2192
9	0,18	0,2	-0,2708	0,0570	0,2767

Выходной сигнал сети, например, по k -у образу, имеет вид ($k = 1, 2, \dots, 9$)

$$\underline{X}_{k1} = U_k \underline{k}_{11} + k_{Hk} \underline{k}_{21};$$

$$\underline{X}_{k2} = U_k \underline{k}_{12} + P_{Hk} \underline{k}_{22};$$

$$\underline{X}_{k3} = U_k \underline{k}_{13} + P_{Hk} \underline{k}_{23};$$

$$\underline{Y}_k = \frac{1}{1 + e^{-(\underline{X}_{k1} \cdot \underline{w}_1 + \underline{X}_{k2} \cdot \underline{w}_2 + \underline{X}_{k3} \cdot \underline{w}_3)}}.$$

Ошибка настройки по k -у образу

$$\varepsilon_k = \underline{y}_k - \underline{d}_k = \text{Re}(\underline{y}_k) - \text{Re}(\underline{d}_k) + j(\text{Im}(\underline{y}_k) - \text{Im}(\underline{d}_k)).$$

Общая ошибка настройки по всем образам подсчитывается суммой

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^9 [(\text{Re}(\underline{y}_k) - \text{Re}(\underline{d}_k))^2 + (\text{Im}(\underline{y}_k) - \text{Im}(\underline{d}_k))^2]$$

Начальные значения коэффициентов нейронов выбираем произвольно в пределах единицы:

$$|\underline{k}_{1i}| \leq 1; |\underline{k}_{2i}| \leq 1; i = 1, \dots, 3.$$

Для минимизации ошибки выбор коэффициентов обычно производится каким-либо минимизационным методом с использованием вектора градиента $\underline{g}$ в пространстве коэффициентов [11]. Направление изменения коэффициентов выбирается по 'антиградиенту' с определенным шагом h :

$$\underline{k}_{ji\ n+1} = \underline{k}_{ji\ n} - g_{ji\ n} h.$$

Вектор градиент в многослойных сетях находится с помощью алгоритма обратного распространения ошибки [10 – 11]. Однако к настоящему времени не найдено распространение градиентного метода на комплексные нейронные сети. Проверка условия возможности взятия производной от функции ошибки также представляет технические трудности [12]. Поэтому в рассматриваемом случае минимизацию ошибки выполняем методом Нелдера-Мида [11], не требующего вычисления производной.

После выполнения полутысячи итераций с точностью $|\varepsilon| \approx 10^{-4}$ найдены следующие значения коэффициентов нейронов:

$$\underline{k}_{11} = 1,619 + j1,350;$$

$$\underline{k}_{21} = -2,781 - j0,746; \quad \underline{k}_{12} = 6,031 + j1,184;$$

$$\underline{k}_{22} = 4,183 + j1,015;$$

$$\underline{k}_{13} = -1,525 + j2,687;$$

$$\underline{k}_{23} = -3,984 + j1,158;$$

$$\underline{w}_1 = -1,842 + j1,113; \quad \underline{w}_2 = 0,329 + j2,795$$

$$; \quad \underline{w}_3 = -2,680 + j1,925.$$

Для проверки работы сети проведено сравнение результатов расчета тока ротора $|\dot{I}_r|$ по решению уравнений электродвигателя (1) и выхода сети $|\underline{Y}|$. График входного напряжения электродвигателя принят непрерывной функцией $U(t)$, а график коэффициента нагрузки принят гладкой функцией $k_H(t)$ в пределах значений образов, рис.2.

Расчетные графики исследуемого тока ротора по (1) (обучающей функции $\underline{d}(t)$) показаны

на рис.3. Графики имеют колебательный характер, отслеживающий изменение нагрузки на электродвигатель.

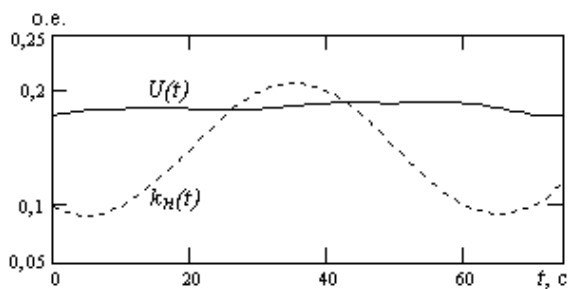


Рис.2. Входные сигналы на нейронную сеть

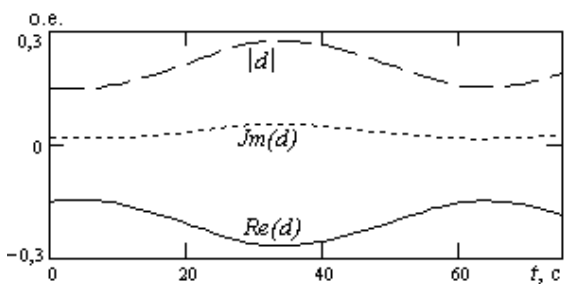


Рис.3. Графики составляющих и модуля комплексной обучающей функции

На рис.4 – 6 приведены графики выхода нейронной сети под воздействием напряжения и нагрузки по рис.2. Графики показывают приемлемую точность работы сети: отклонение расчетного графика тока ротора от выходного сигнала сети составляет около 5 %.

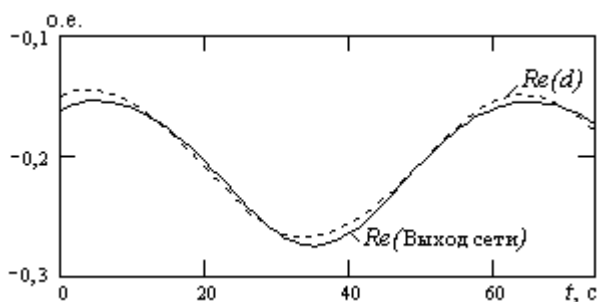


Рис.4. Сравнение вещественных составляющих эталона и выхода нейронной сети

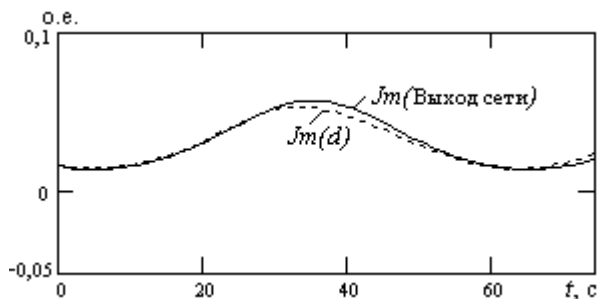


Рис.5. Сравнение мнимых составляющих эталона и выхода нейронной сети

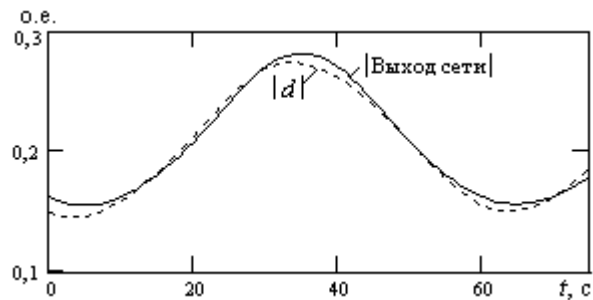


Рис.6. Сравнение модулей эталона и выхода нейронной сети

Заключение

В статье предложена концепция применения комплексных нейронных сетей для моделирования, анализа и диагностирования электрических систем переменного тока на примере асинхронного электродвигателя переменного тока. Показаны основные достоинства и трудности применения комплексной математики для проектирования нейронных сетей. Достоинством является естественная увязка комплексных нейронных сетей с процедурами анализа электрических систем переменного тока, так как подобные системы всегда рассчитываются и исследуются с помощью комплексных чисел.

Основное затруднение состоит в проверке теоретической возможности дифференцирования сложных выходных функций активации нейронов, а также в отсутствии возможности применить подобные производные для эффективного отыскания минимума функции ошибки.

Результаты проекта продемонстрированы на примере двухслойной нейронной сети для отслеживания внутреннего тока электродвигателя переменного тока, недоступного для непосредственного измерения. Численные эксперименты с построенной нейронной сетью показали достаточную точность предлагаемого способа.

Перспективным направлением дальнейшего исследования является обоснование применения производных от комплексных функций для эффективного поиска минимума функций по комплексным аргументам.

Список литературы

1. Лемин Л.А. Эксплуатация судовых систем электроснабжения / Л.А.Лемин, А.В.Прусаков, А.В.Григорьев. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О.Макарова, 2006. – 184 с.
2. Сюбаев М.А. Эксплуатация судового электрооборудования / М.А.Сюбаев. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О.Макарова, 2008. – 48 с.
3. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б.Барский. –

- М.: Изд-во «Финансы и статистика», 2004. – 176 с.
4. Вьюгин В.В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования / Вьюгин В.В. – М.: Изд-во «МЦНМО», 2013. – 391 с.
 5. Орловский И.А. Оценка вектора состояния асинхронного двигателя искусственной нейронной сетью / И.А.Орловский // Тезисы докладов 10-й Международной конференции «Автоматика – 2003», Т.3. – Севастополь, изд-во СевНТУ, 2003. – С. 91.
 6. Касаткин А.С. Электротехника / А.С.Касаткин, М.В.Немцов. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2002. – 542 с.
 7. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Оссовский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
 8. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект / Л.Н.Ясницкий. – Изд-во «Академия», 2005. – 176 с.
 9. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / М.Тим Джонс. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 312 с.
 10. Бенджио И. Глубокое обучение / И.Бенджио., Я.Гудфеллоу, А.Курвилль. - Изд – во «ДМК - Пресс», 2017. – 656 с.
 11. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д.Рутковская, М.Пилиньский, Л.Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
 12. Карпенко А.И. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2021. – 446 с.
 - P. 91.
 6. Kasatkin A.S. *Electrotehnica* [Electrical engineering]. М.: The Publishing house «Higher school», 2002 – 542 p.
 7. Ossovskii S. *Neironnye seti dlya obrabotki informatsii* [Neuron networks for treatment of information]. М.: Izd-vo is «Finances and statistics», 2004. – 344 p.
 8. Yasnitskii L.N. *Vvedenie v iskustvennyi intellekt* [Introduction to artificial intellect]. М.: Izd-vo is «Academy», 2005. – 176 p.
 9. Dzhons M.T. *Programmirovaniye iskustvennogo intellekta v prilozheniyakh* [Programming of artificial intellect is in appendixes] – М.: The Publishing house of DMK Press, 2015. – 312 p.
 10. Bendzhio I. *Glubokoe obuchenie* [Deep teaching]. М.: The Publishing house of DMK, 2017. – 656 p.
 11. Rutkovskaya D. *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neuron networks, genetic algorithms and unclear systems]. М.: The Publishing house “Hot line – Telekom”, 2006. – 452 p.
 12. Karpenko A.I. *Sovremennye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoi* [Modern algorithms of searching optimization. Algorithms, inspired nature]. М.: Izd-vo MSTU nm. N.E.Baumana, 2021. – 446 p.

References

1. Lemin L.A., Prussakov A.V., Grigorev A.V. *Ekspluatatsiya sudovykh system elektrosnabzheniya* [Exploitation of the ship systems of electrosupply]. SPb.: Izd-vo GSA nm. adm. S.O.Makarova, 2006. – 184 p.
2. Syubaev M.A. *Ekspluatatsiya sudovogo elektrooborudovaniya* [Exploitation of the ship electroequipment]. SPb.: Izd-vo GSA nm. adm. S.O.Makarova, 2008. – 48 p.
3. Barskii A.B. *Neironnye seti, raspoznavanie, upravlenie, prinyatie peshenii* [Neuron networks: recognition, management, making a decision]. М.: Izd-vo is «Finances and statistics», 2004. – 176 p.
4. V'yugin V.V. *Matematicheskie osnovy mashinnogo obucheniya i prognozirovaniya* [Mathematical bases of computer-aided instruction and prognostication] М.: Izd-vo iz «MTsNMO», 2013. – 391 p.
5. Orlovskii I.A. *Otsenka vektora sostoyaniya asinkhronnogo dvigatelya iskustvennoi neironnoi set'yu* [Estimation of vector of the state of asynchronous engine an artificial neuron network]. Theses of lectures of the 10 International conference “Automation – 2003». – Sevastopol, Izd-vo SevNTU, 2003.

УДК 533.9.07

Масштабирование электродугового реактора постоянного тока для синтеза карбида вольфрама в открытой воздушной среде

П.В. Поваляев¹, Ж.С. Болатова¹, А.В. Власов¹, А.Я. Пак¹, Р.С. Мартынов¹¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, г. Томск, 634050, Россия, pvp13@tpu.ru, zsb3@tpu.ru, avv49@tpu.ru, ayapak@tpu.ru, rsm6@tpu.ru

Статья поступила 28.08.2023 г.; после доработки 29.08.2023 г.

Аннотация

В работе представлены результаты разработки экспериментального стенда для синтеза карбида вольфрама под воздействием дугового разряда постоянного тока в открытой воздушной среде. Увеличенное количество присоединенной мощности и изменение конфигурации разрядного контура, а именно переход от однофазного устройства реактора к трехфазному, обеспечивает повышение объема загружаемого сырья и, соответственно, выход готовой продукции. По результатам экспериментальной серии была определена конфигурация разрядного контура, обеспечивающая синтез карбида вольфрама под воздействием плазмы дугового разряда.

Ключевые слова: безвакуумный электродуговой синтез, трехфазный электродуговой реактор, карбид вольфрама, масштабирование электродугового реактора.

Scaling up a DC arc reactor for tungsten carbide synthesis in an open-air atmosphere

P.V. Povalyaev¹, Zh.S. Bolatova¹, A.V. Vlasov¹, A.Ya. Pak¹, R.S. Martynov¹¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia, pvp13@tpu.ru, zsb3@tpu.ru, avv49@tpu.ru, ayapak@tpu.ru, rsm6@tpu.ru

Received 28.08.2023 y.; received in final form 29.08.2023 y.

Abstract

This paper presents the results of the development of an experimental bench for the synthesis of tungsten carbide by DC arc discharge in an open-air atmosphere. Increased amount of connected power and change in configuration of discharge circuit, namely transition from single-phase reactor device to three-phase one, provides increase in mass of initial mixture and quantity of finished products. According to the results of experimental series the configuration of discharge circuit providing synthesis of tungsten carbide under influence of arc discharge plasma was determined.

Keywords: vacuum-free arc synthesis, three-phase arc reactor, tungsten carbide, scaling of the arc reactor.

Введение

Карбиды переходных металлов представляют собой класс соединений, обладающих уникальным сочетанием физических свойств – высокая температура плавления [1], высокая стойкость к окислению и коррозии [2], электро- и теплопроводность [3,4], также карбиды металлов обладают возможностью перехода в сверхпроводящее состояние при высоких температурах [5]. Карбиды широко применяются для изготовления

композитных материалов с металлической матрицей или же цементированных карбидов. Благодаря своим свойствам (высокая температура плавления (2600–2850 °С) и высокая твердость (16–22 ГПа) в сочетании с высокой вязкостью разрушения (28 МПа·м^{1/2}), карбид вольфрама нашел наибольшее распространение для получения цементированных карбидов.

Обычно такие соединения включают в себя твердую фазу WC и связующие элементы для зе-

рен WC, в большинстве случаев в качестве связующего элемента, в обычном процессе спекания, используется кобальт [6,7].

В настоящее время было проведено большое количество исследований и технологических разработок по поиску и реализации методов синтеза карбидов и карбида вольфрама, в частности [8]. При выборе методики синтеза прежде всего учитываются экономические соображения, свойства порошка и технологичность процесса.

Например, известен простой и экономичный способ синтеза наночастиц карбида вольфрама путем механического измельчения порошков вольфрама и углерода (механохимический синтез) [9].

Также процесс получения порошка карбида вольфрама возможен с использованием методики осаждения из газовой фазы [10], для получения консолидированного WC в основном используют искровое плазменное спекание [11]. Использование вышеописанных методик обеспечивает полное завершение реакций между исходными компонентами с получением карбидов без примесей.

Помимо вышеописанных методов, сообщалось о получении наноразмерных порошков с использованием плазменных технологий [12,13]. Достижение высоких температур в процессе инициации и горения дугового разряда ($\sim 12\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$) обеспечивает высокую скорость протекания синтеза карбидов (1-2 мин). Производство порошков с помощью плазменных технологий также имеет уникальное преимущество – процесс синтеза порошков может быть завершен в один этап, даже с использованием оксидов [14].

Несмотря на все технологическое разнообразие существующих типов и групп, плазменные реакторы можно классифицировать по типу используемой среды, которая заполняет реакционную зону. Таким образом, процесс синтеза в плазменных реакторах может протекать в условиях защитной среды (вакуум или инертный газ) или в условиях открытой воздушной среды. В условиях промышленности наибольшее распространение имеют плазменные процессы, протекающие при атмосферном давлении.

Несмотря на преимущества плазменных методов (высокая скорость выхода на рабочий режим и высокие температуры процесса синтеза) выход готового продукта является чрезвычайно низким. Использование как безвакуумных дуго-

вых реакторов, так и реакторов, работающих в защитной среде, характеризуется широким распределением температурного поля внутри разрядного контура и большими потерями температур, пропорционально отдалению от места инициации дуги. Такое распределение теплового поля внутри реакционной зоны приводит к образованию участков с относительно низкими температурами.

В результате чего происходит появление примесей в готовом продукте, что затрудняет плазменную обработку материала в больших объемах. В опубликованных работах по электродуговой методике синтеза материалов выход получаемых материалов составляет (0,5 г – 4 г) [15,16], но в большинстве случаев информация о выходе готового продукта не приводится. Исследования по увеличению выхода готовой продукции с использованием дуговых реакторов, также практически не обсуждаются. В связи с этим возникла необходимость в поиске способа модернизации конструкции электродугового реактора для повышения выхода получаемого продукта синтеза.

Постановка задачи и целей исследования

В настоящем исследовании представлены результаты по модернизации существующей модели безвакуумного дугового реактора с целью увеличения выхода готовой продукции и апробации разработанного реактора на примере синтеза порошка карбида вольфрама.

Модернизация безвакуумного электродугового реактора основана на необходимости увеличения выхода готовой продукции за один рабочий цикл. Прототипом для построения модернизированного реактора послужил безвакуумный дуговой реактор постоянного тока, разработанный ранее авторами данной статьи. Принцип и устройство дугового реактора представлены в предыдущих работах научной группы [17–19]. Под модернизацией дугового реактора предполагается изменение конструктивных особенностей разрядного контура и повышение электрической мощности проектируемой установки, что также подразумевает изменение схемы электропитания. На рис. 1 представлена схема трехфазного электродугового реактора постоянного тока с вертикальным расположением электродов.

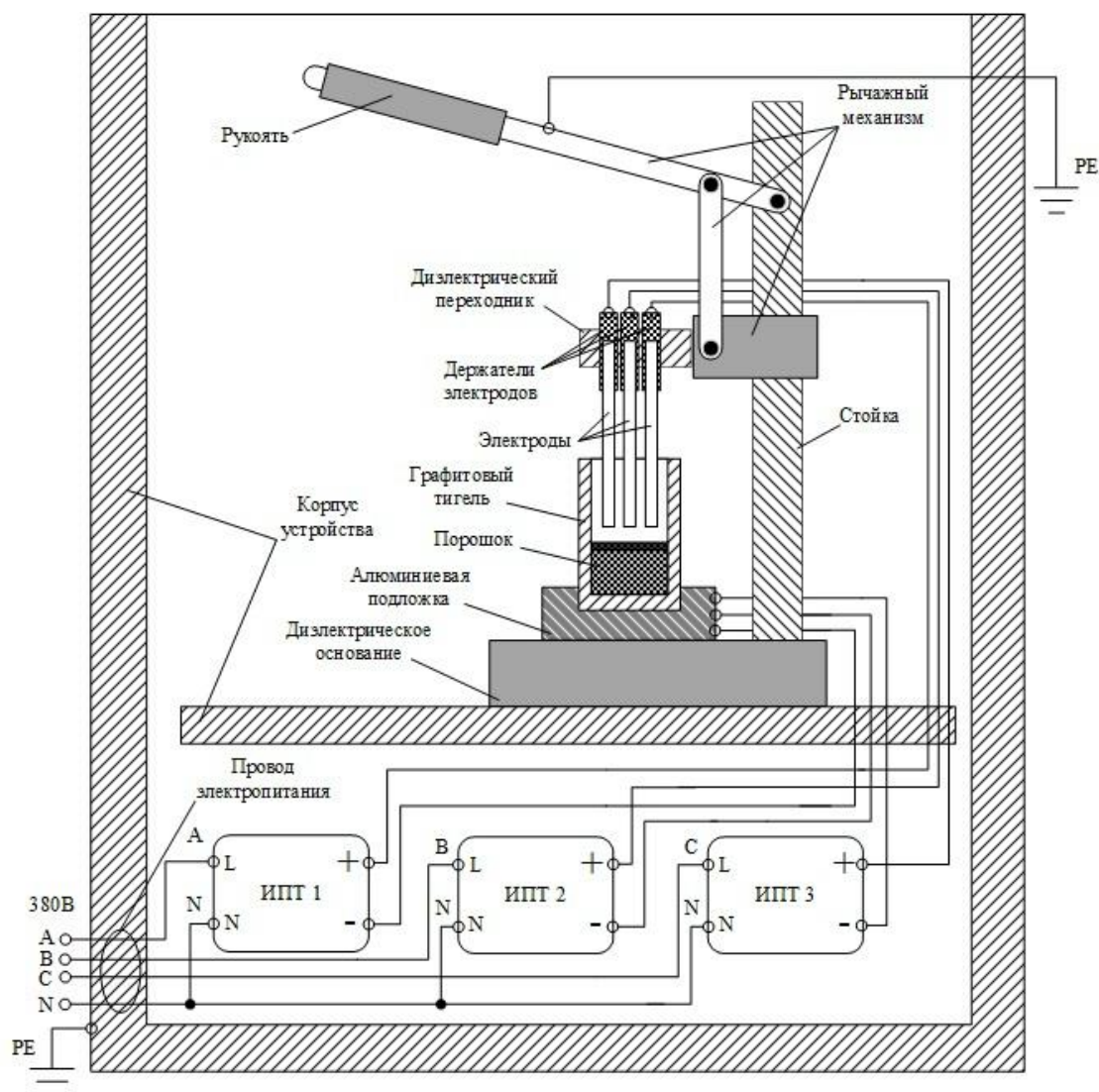


Рис. 1. Принципиальная схема трехфазного дугового реактора постоянного тока

Устройство разрядного контура реактора

Схема разрядного контура однофазного дугового реактора состояла из токоведущего держателя из стали, куда устанавливался графитовый электрод (анод), и алюминиевой пластины с углублениями для установки графитовых тиглей (катод). Токоведущие части разрядного контура устанавливались на стойку, оснащенную шаговыми двигателями, что обеспечивает вертикальное перемещение анода. Разрядный контур трехфазного дугового реактора включает в себя: три независимые стальные гильзы для установки

графитовых электродов и алюминиевую пластину, установленную на основание направляющей стойки. Фиксация токоведущих гильз на стойке осуществляется с использованием диэлектрического переходника цилиндрической формы с тремя равноудаленными сквозными отверстиями под установку гильз. К гильзам, посредством

проводного соединения, подключаются положительные выводы трех источников постоянного тока, к алюминиевой пластине – отрицательные выводы. Таким образом, реализована возможность одновременной инициации трех дуговых разрядов в определенных областях реакционной зоны, независимых друг от друга. Данное техническое решение позволяет увеличить размеры катодного пятна и площадь распределения теплового поля.

Электропитание трехфазного дугового реактора

Для увеличения подводимой электрической мощности реактора, как было описано ранее, была изменена схема электропитания. В разрабатываемом трехфазном реакторе используются три источника постоянного тока. Источник постоянного тока представляет собой выпрямительно-инверторный преобразователь (Deko

DKWM220A) с напряжением питания 220 В и возможностью регулирования рабочих токов в диапазоне от 20 до 220 А. Мощность одного преобразователя составляет 8,8 кВт, использование трех преобразователей обеспечивает суммарную мощность реактора ~ 26 кВт. Питание преобразователей осуществляется от промышленной трехфазной сети 380 В переменного тока, где для питания каждого источника используется одна фаза и нейтраль. Источники питания устанавливаются в телекоммуникационный шкаф на диэлектрическую платформу. Органы управления источниками питания (кнопки запуска/отключения и регуляторы тока), а также индикация текущих показаний силы тока на источнике питания вынесены на лицевую панель шкафа. Изображение разработанного электродугового стенда представлено на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид передней панели и реакционной зоны трехфазного дугового реактора

Устройство трехфазного реактора реализовано с распределением основных частей устройства на отдельные блоки (блок электропитания и реакционная зона), обеспечивая простоту транспортировки, эксплуатации и обслуживания реактора. После завершения разработки и проведения сборочных работ была произведена апробация трехфазного дугового реактора путем синтеза карбида вольфрама.

Методика проведения эксперимента

Исходная смесь карбида вольфрама изготавливалась с использованием порошков вольфрама и аморфного углерода при атомарном соотношении W:C = 1:1,05.

Исходная смесь суммарной массой 30 г смешивалась в посуде из диоксида циркония в течение одного часа. Для смешивания порошков использовалась вибрационная мельница Retsch MM 500 папо. Избыток аморфного углерода на 5%, в данном случае, позволяет избежать образования

областей с дефицитом углерода в исходной смеси в процессе нагрева. Ввиду того, что при начале процесса термического воздействия на исходную смесь в графитовом тигле могут присутствовать частицы кислорода, которые под воздействием температур взаимодействуют с углеродом, образуя соединения CO или CO₂. Такой процесс приводит к испарению углерода из зоны реакции и появлению в материале фаз с дефицитом углерода. Дальнейшее окисление углерода и исходной смеси в целом не происходит ввиду особенностей используемой методики синтеза, которая приведена далее.

Процесс безвакуумного электродугового синтеза, как было описано ранее, протекает в атмосфере воздуха при высоких температурах, в свою очередь, обрабатываемые продукт синтеза не подвергаются окислению. Данный эффект объясняется процессом самоэкранирования зоны реакции: в момент инициации и последующего горения дугового разряда происходит образование высоких температур в реакционной зоне (более 10 000 °С в месте инициации разряда), что приводит к разрушению графитовых электродов (анода). Часть анода эродирует на катод, оставшиеся же частицы графита выбрасываются в воздух и при взаимодействии с кислородом образуют соединения углекислого (CO₂) и угарного (CO) газа, что приводит к экранированию зоны реакции и предотвращению окисления образца в процессе синтеза, такой эффект также описывался в других работах научной группы [19].

Ранее подготовленная смесь, массой от 30 г до 50 г загружалась в графитовый тигель, который устанавливался на алюминиевую пластину. Графитовые электроды устанавливались в стальные гильзы и располагались над графитовым тиглем. После запуска источников постоянного тока и выбора значения силы тока (200 А), электроды перемещались вертикально вниз до соприкосновения с исходной смесью и после этого отводились на определенное расстояние для инициации дуговых разрядов. По истечении заданного времени горения разрядов (90 с – 120 с), электроды отводились в исходное положение, тем самым прекращая горение разрядов. После остывания элементов системы исходная смесь извлекалась из графитового тигля. С целью увеличения выхода продукта, а также повышения его чистоты, в данном исследовании изменялась конфигурация катода.

Исследование фазового состава полученных образцов карбида вольфрама проводилось с помощью метода рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра Shimadzu XRD

7000 s, $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$.

Процесс синтеза порошка карбида вольфрама также был зарегистрирован с помощью высокоскоростной камеры Photron FASTCAM Mini UX100, скорость записи камеры, при разрешении 1280×1024 пикселей, составляет 4000 кадров в секунду.

Результаты исследования

На рис. 3 представлены изменения, которые были внесены в конструкцию разрядного контура при синтезе карбида вольфрама с использованием трехфазного дугового реактора.

Для проведения экспериментальной серии использовались три конфигурации разрядного контура, при выборе конфигурации учитывались такие факторы как: масса загружаемой смеси, процент выхода готового продукта и фазовый состав продукта.

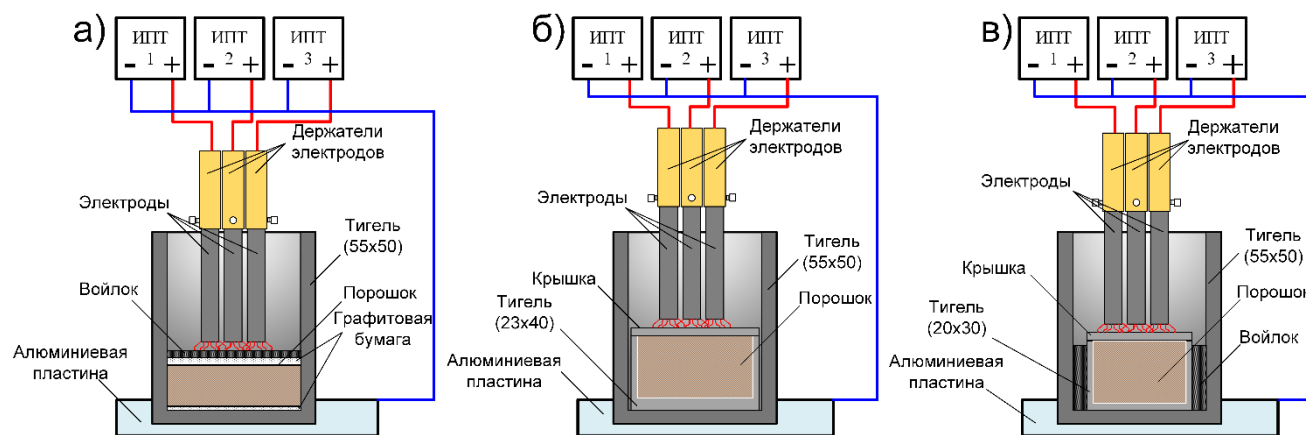


Рис. 3. Конфигурации разрядного контура трехфазного электродугового реактора: а) при которой исходная смесь помещается в тигель и закрывается графитовым листом и войлоком; б) при которой исходная смесь помещается в тигель меньшего размера и накрывается крышкой; в) при которой исходная смесь помещается в тигель меньшего размера, обернутый войлоком с целью теплоизоляции, и накрывается крышкой

Недостатками такой конструкции является большая вероятность прогорания и разрушения как войлока, так и графитового листа. В результате повышается вероятность выброса исходной смеси из тигля с последующим окислением. Также в процессе горения дугового разряда войлок может пригорать к графитовым электродам, что приводит к неравномерному и неконтролируемому процессу горения дуговых разрядов, и как следствие, к неполной переработке исходного сырья, его окислению или же формированию примесей.

Конфигурация, представленная на рис. 3б, ликвидирует проблему с возможным выбросом исходной смеси из зоны реакции и обеспечивает одновременную инициацию и горение дуговых разрядов на каждом из электродов. При такой

При использовании конфигурации, представленной на рис. 3а, на дно тигля устанавливался графитовый лист толщиной 0,2 мм, затем исходная смесь массой 50 г помещалась в полость графитового тигля (высота 55 мм, внешний диаметр 50 мм и внутренний 40 мм). После осуществления загрузки исходной смеси в графитовый тигель, смесь закрывалась вкладкой из графитового листа и войлока.

В таком случае образование дуговых разрядов происходит между графитовым войлоком и графитовыми стержнями. Такая конфигурация разрядного контура позволяет производить загрузку большого объема сырья в полость тигля, а также обеспечить равномерное распределение теплового поля по всему объему порошка, тем самым предотвратить появление в смеси участков с низкими температурами.

конфигурации для загрузки исходной смеси (50 г) используется графитовый тигель меньших размеров (высота 23 мм, внешний диаметр 40 мм), устанавливаемый в полость тигля больших размеров. По завершении загрузки смеси в тигель и его установки на алюминиевую пластину исходная смесь накрывается графитовой крышкой. После чего воздействие дугового разряда производится на крышку графитового тигля, что приводит к нагреву графитовых элементов реактора. Такая конфигурация предотвращает попадание эродированного углерода в исходную смесь, повышая процент выхода получаемого продукта и его чистоту.

По результатам проведенного эксперимента, при использовании данной конфигурации и максимальных параметров дугового реактора

(сила тока 200 А и время воздействия дугового разряда 120 с), реакция по синтезу карбида вольфрама не осуществляется, ввиду частичной переработки исходных компонентов. Наличие исходных компонентов в продукте синтеза при таком объеме исходного сырья свидетельствует о том, что формирование температур, достаточных для синтеза карбида вольфрама, не происходит. Таким образом, необходимо произвести работы по теплоизоляции внутреннего тигля, что приведет к выравниванию теплового поля внутри реакционной зоны. Зарегистрированный процесс горения дугового разряда с использованием высокоскоростной камеры представлен на рис. 4.

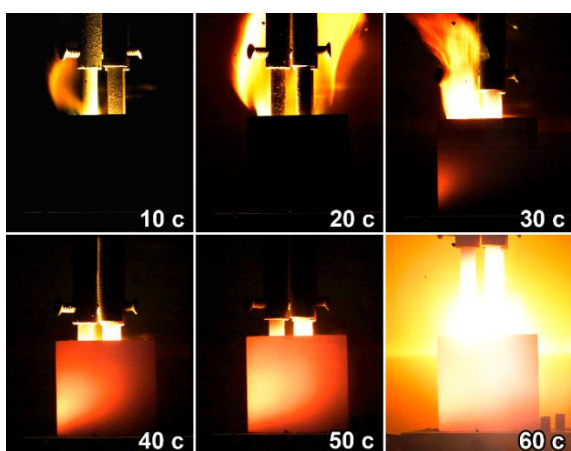


Рис. 4. Процесс электродугового синтеза карбида вольфрама, зафиксированный с помощью высокоскоростной камеры Photron

На рис. 3в представлена схема разрядного контура, где также, как и в предыдущей конфигурации, исходная смесь загружается в полость графитового тигля меньших размеров. Однако в данном случае используется внутренний тигель меньших размеров (высота 20 мм, диаметр 30 мм), а внутренние стенки внешнего тигля изолированы войлоком. При таких конструктивных изменениях масса загружаемой смеси уменьшается с 50 г до 30 г, но повышается теплоизоляция внутреннего тигля, что приводит к выравниванию теплового поля. Таким образом, использование схемы с теплоизоляцией войлоком внутреннего тигля обеспечивает полное протекание реакции по синтезу карбида вольфрама, при выходе готового продукта ~ 99 %.

Для определения фазового состава полученного порошка, при использовании различных конфигураций разрядного контура, использовался рентгенофазовый анализ. Рентгеновские дифрактограммы полученных образцов карбида

вольфрама представлены на рис. 5.

Полученные картины рентгеновской дифракции согласуются с литературными данными, согласно которым образование карбида вольфрама происходит по реакциям 1 и 2 [20]:

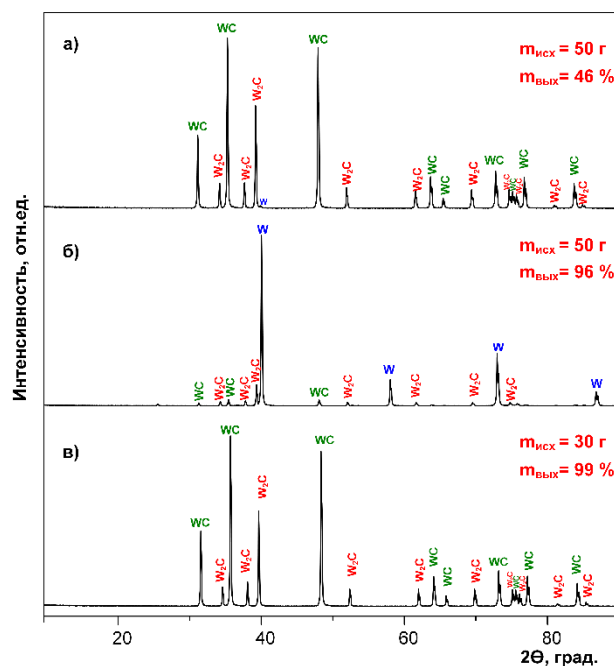


Рис. 5. Картины рентгеновской дифракции продуктов плазменной обработки, полученных на трехфазном электродуговом реакторе постоянного тока при использовании: а) конфигурации разрядного контура на рис. 3а; б) конфигурации разрядного контура на рис. 3б; в) конфигурации разрядного контура на рис. 3в

По полученным картинам рентгеновской дифракции в каждом из образцов идентифицируются максимумы карбида вольфрама WC и W₂C разной интенсивности. Для обозначения полученных образцов в плазме дугового разряда используются обозначения, соответствующие используемым конфигурациям, представленным на рис. 3. Карбид вольфрама W₂C является фазой, образующейся при дефиците углерода в составе исходной смеси [20,21]. Причиной появления фазы с дефицитом углерода, вероятно, является испарение исходного углерода из зоны реакции, что было описано ранее. Возможно, при повышении массы загружаемого сырья, также необходимо увеличивать долю углерода в исходной смеси. Стоит отметить, отсутствие оксидных соединений в составе продуктов синтеза, что

подтверждает сохранение эффекта самоэкранирования реакционной зоны при масштабировании дугового реактора.

При анализе рентгеновских дифрактограмм образца (а) идентифицированы высокоинтенсивные максимумы карбидов вольфрама WC и W₂C, что свидетельствует о формировании температур, достаточных для формирования данных соединений в зоне реакции. Однако, в составе готового продукта также идентифицирован максимум исходного вольфрама малой интенсивности. Неполная переработка сырья может быть обусловлена неравномерным распределением температурного поля зоны реакции, что может привести к созданию областей с относительно низкими температурами. Неравномерное распределение теплового поля может быть вызвано разрушением графитового листа и войлока, закрывающими исходную смесь от прямого воздействия дугового разряда. Разрушение защитных материалов привело к снижению выхода готового продукта до 46 % от массы загружаемого сырья, что свидетельствует о выбросе смеси из зоны реакции.

Рентгеновские дифрактограммы образца (б) включают в себя высокоинтенсивные фазы исходного вольфрама и следы WC и W₂C малой интенсивности, что свидетельствует о частичной переработке исходного сырья. Присутствие высокоинтенсивных фаз исходных компонентов в составе образца (б) объясняется тем, что требуемое тепловое поле для полного завершения реакции по синтезу карбида вольфрама (50 г) не формируется. Также стоит отметить, что выход получаемого продукта при данной конфигурации составляет 96 % от массы исходной смеси.

При анализе рентгеновских дифрактограмм образца (в) идентифицируются высокоинтенсивные максимумы карбида вольфрама WC и W₂C. Максимумы исходных компонентов отсутствуют, что, вероятно, связано с равномерным распределением теплового поля на всех участках реакционной зоны. Таким образом, равномерное распределение теплового поля обеспечило завершение реакции синтеза карбида вольфрама. При использовании данной конфигурации разрядного контура выход готового продукта составляет 99 % от массы загружаемого сырья (30 г). Потеря массы на 1 % может быть связана с испарением остаточной влаги из исходной смеси или же пригоранием продукта синтеза к крышке или стенкам графитового тигля. Таким образом, конфигурация (в) обеспечивает синтез карбида вольфрама, изолируя конечный продукт от попадания примесей.

Заключение

По совокупности представленных данных можно сделать вывод о возможности масштабирования атмосферного электродугового реактора для синтеза материалов, результат работы которого продемонстрирован на примере получения карбида вольфрама. Особенностью применяемого подхода является возможность реализации процесса синтеза без использования специального оборудования по созданию защитной среды зоны реакции за счет эффекта самоэкранирования зоны реакции газами CO и CO₂. По итогам экспериментов, ввиду отсутствия оксидных соединений в конечном продукте определено, что при увеличении объема реакционной зоны и мощности используемого реактора эффект самоэкранирования сохраняется, что является практически важным результатом в области плазменных технологий.

По данным проведенной серии экспериментов определена оптимальная конструкция разрядного контура с равномерным распределением теплового поля в реакционной зоне, которая обеспечивает завершение процесса синтеза материалов с выходом готового продукта в 99 % от массы исходной смеси. Помимо этого, выбранная конфигурация предотвращает попадание эродированного углерода в конечный продукт.

Исследование выполнено за счет гранта № FSWW-2022-0018, реализуемого в рамках проекта создания новых молодежных лабораторий под руководством молодых перспективных исследователей.

Список литературы

1. Liu J.X., Kan Y.M., Zhang G.J. Synthesis of ultra-fine hafnium carbide powder and its pressureless sintering // Journal of the American Ceramic Society. Wiley Online Library, 2010. Vol. 93, № 4. P. 980–986.
2. Ebrahimi-Kahrizsangi R., Zadeh H.M., Nemati V. Synthesis of chromium carbide by reduction of chromium oxide with methane // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Elsevier, 2010. Vol. 28, № 3. P. 412–415.
3. Kral C., Lengauer W., Rafaja D., Ettmayer P. Critical review on the elastic properties of transition metal carbides, nitrides and carbonitrides // Journal of Alloys and Compounds. Elsevier, 1998. Vol. 265, № 1–2. P. 215–233.
4. Koc R., Kodambaka S.K. Tungsten carbide (WC) synthesis from novel precursors // Journal of the European Ceramic Society. Elsevier, 2000. Vol. 20, № 11. P. 1859–1869.
5. Kosolapova T.Y. Carbides: properties, production,

- and applications. Springer Science & Business Media, 2012.
6. Ravikumar K., Kiran K., Sreebalaji V.S. Characterization of mechanical properties of aluminium/tungsten carbide composites // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. Elsevier, 2017. Vol. 102. P. 142–149.
 7. Medeiros F.F.P., De Oliveira S.A., De Souza C.P., Da Silva A.G.P., Gomes U.U., De Souza J.F. Synthesis of tungsten carbide through gas-solid reaction at low temperatures // *Materials Science and Engineering A*. Elsevier, 2001. Vol. 315, № 1–2. P. 58–62.
 8. Fang Z.Z., Wang X., Ryu T., Hwang K.S., Sohn H.Y. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide - A review // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2009. Vol. 27, № 2. P. 288–299.
 9. Hoseinpour A., Vahdati Khaki J., Marashi M.S. Mechanochemical synthesis of tungsten carbide nano particles by using WO₃/Zn/C powder mixture // *Materials Research Bulletin*. Elsevier, 2013. Vol. 48, № 2. P. 399–403.
 10. Kim J.C., Kim B.K. Synthesis of nanosized tungsten carbide powder by the chemical vapor condensation process // *Scripta Materialia*. Elsevier, 2004. Vol. 50, № 7. P. 969–972.
 11. Zhao J., Holland T., Unuvar C., Munir Z.A. Sparking plasma sintering of nanometric tungsten carbide // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2009. Vol. 27, № 1. P. 130–139.
 12. Ryu T., Sohn H.Y., Hwang K.S., Fang Z.Z. Plasma synthesis of tungsten carbide and cobalt nanocomposite powder // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier, 2009. Vol. 481, № 1–2. P. 274–277.
 13. Enneti R.K. Synthesis of nanocrystalline tungsten and tungsten carbide powders in a single step via thermal plasma technique // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2015. Vol. 53. P. 111–116.
 14. Zhang H., Bai L., Hu P., Yuan F., Li J. Single-step pathway for the synthesis of tungsten nanosized powders by RF induction thermal plasma // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2012. Vol. 31. P. 33–38.
 15. Song M., Wang C., Chen X., Ma J., Xia W. Large-scale in-situ synthesis of nitrogen-doped graphene using magnetically rotating arc plasma // *Diamond and Related Materials*. 2021. Vol. 116. P. 108417.
 16. Pak A.Y., Bolatova Z., Nikitin D.S., Korchagina A.P., Kalinina N.A., Ivashutenko A.S. Glass waste derived silicon carbide synthesis via direct current atmospheric arc plasma // *Waste Management*. Elsevier, 2022. Vol. 144. P. 263–271.
 17. Pak A.Y., Grinchuk P.S., Gumovskaya A.A., Vassilyeva Y.Z. Synthesis of transition metal carbides and high-entropy carbide TiZrNbHfTaC₅ in self-shielding DC arc discharge plasma // *Ceramics International*. Elsevier, 2022. Vol. 48, № 3. P. 3818–3825.
 18. Pak A.Y., Korchagina A.P., Gumovskaya A.A., Yankovsky S.A., Arysheva G. V., Kolobova E.N., Bolatova Z. Energy-efficient direct current arc plasma synthesis of tantalum carbide powder by advanced vacuum-free method // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2023. Vol. 112. P. 106131.
 19. Pak A.Y., Shanenkov I.I., Mamontov G.Y., Kokorina A.I. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2020. Vol. 93. P. 105343.
 20. Luković J., Babić B., Bučevac D., Prekajski M., Pantić J., Baščarević Z., Matović B. Synthesis and characterization of tungsten carbide fine powders // *Ceramics International*. Elsevier, 2015. Vol. 41, № 1. P. 1271–1277.
 21. Bretzler P., Huber M., Rane A.A., Jentoft R.E., Köhler K., Jentoft F.C. Selective synthesis of tungsten carbide phases W₂C and WC as hydrogenation catalysts // *Journal of Catalysis*. Elsevier, 2022. Vol. 405. P. 60–73.

References

1. Liu J.X., Kan Y.M., Zhang G.J. Synthesis of ultra-fine hafnium carbide powder and its pressureless sintering // *Journal of the American Ceramic Society*. Wiley Online Library, 2010. Vol. 93, № 4. P. 980–986.
2. Ebrahimi-Kahrizsangi R., Zadeh H.M., Nemati V. Synthesis of chromium carbide by reduction of chromium oxide with methane // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2010. Vol. 28, № 3. P. 412–415.
3. Kral C., Lengauer W., Rafaja D., Ettmayer P. Critical review on the elastic properties of transition metal carbides, nitrides and carbonitrides // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier, 1998. Vol. 265, № 1–2. P. 215–233.
4. Koc R., Kodambaka S.K. Tungsten carbide (WC) synthesis from novel precursors // *Journal of the European Ceramic Society*. Elsevier, 2000. Vol. 20, № 11. P. 1859–1869.
5. Kosolapova T.Y. Carbides: properties, production, and applications. Springer Science & Business Media, 2012.
6. Ravikumar K., Kiran K., Sreebalaji V.S. Characterization of mechanical properties of aluminium/tungsten carbide composites // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. Elsevier, 2017. Vol. 102. P. 142–149.
7. Medeiros F.F.P., De Oliveira S.A., De Souza C.P., Da Silva A.G.P., Gomes U.U., De Souza J.F. Synthesis of tungsten carbide through gas-solid

- reaction at low temperatures // *Materials Science and Engineering A*. Elsevier, 2001. Vol. 315, № 1–2. P. 58–62.
8. Fang Z.Z., Wang X., Ryu T., Hwang K.S., Sohn H.Y. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide - A review // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2009. Vol. 27, № 2. P. 288–299.
 9. Hoseinpour A., Vahdati Khaki J., Marashi M.S. Mechanochemical synthesis of tungsten carbide nano particles by using WO₃/Zn/C powder mixture // *Materials Research Bulletin*. Elsevier, 2013. Vol. 48, № 2. P. 399–403.
 10. Kim J.C., Kim B.K. Synthesis of nanosized tungsten carbide powder by the chemical vapor condensation process // *Scripta Materialia*. Elsevier, 2004. Vol. 50, № 7. P. 969–972.
 11. Zhao J., Holland T., Unuvar C., Munir Z.A. Sparking plasma sintering of nanometric tungsten carbide // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2009. Vol. 27, № 1. P. 130–139.
 12. Ryu T., Sohn H.Y., Hwang K.S., Fang Z.Z. Plasma synthesis of tungsten carbide and cobalt nanocomposite powder // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier, 2009. Vol. 481, № 1–2. P. 274–277.
 13. Enneti R.K. Synthesis of nanocrystalline tungsten and tungsten carbide powders in a single step via thermal plasma technique // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2015. Vol. 53. P. 111–116.
 14. Zhang H., Bai L., Hu P., Yuan F., Li J. Single-step pathway for the synthesis of tungsten nanosized powders by RF induction thermal plasma // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2012. Vol. 31. P. 33–38.
 15. Song M., Wang C., Chen X., Ma J., Xia W. Large-scale in-situ synthesis of nitrogen-doped graphene using magnetically rotating arc plasma // *Diamond and Related Materials*. 2021. Vol. 116. P. 108417.
 16. Pak A.Y., Bolatova Z., Nikitin D.S., Korchagina A.P., Kalinina N.A., Ivashutenko A.S. Glass waste derived silicon carbide synthesis via direct current atmospheric arc plasma // *Waste Management*. Elsevier, 2022. Vol. 144. P. 263–271.
 17. Pak A.Y., Grinchuk P.S., Gumovskaya A.A., Vassilyeva Y.Z. Synthesis of transition metal carbides and high-entropy carbide TiZrNbHfTaC₅ in self-shielding DC arc discharge plasma // *Ceramics International*. Elsevier, 2022. Vol. 48, № 3. P. 3818–3825.
 18. Pak A.Y., Korchagina A.P., Gumovskaya A.A., Yankovsky S.A., Arysheva G. V., Kolobova E.N., Bolatova Z. Energy-efficient direct current arc plasma synthesis of tantalum carbide powder by advanced vacuum-free method // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2023. Vol. 112. P. 106131.
 19. Pak A.Y., Shanenkov I.I., Mamontov G.Y., Kokorina A.I. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2020. Vol. 93. P. 105343.
 20. Luković J., Babić B., Bučevac D., Prekajski M., Pantić J., Baščarević Z., Matović B. Synthesis and characterization of tungsten carbide fine powders // *Ceramics International*. Elsevier, 2015. Vol. 41, № 1. P. 1271–1277.
 21. Bretzler P., Huber M., Rane A.A., Jentoft R.E., Köhler K., Jentoft F.C. Selective synthesis of tungsten carbide phases W₂C and WC as hydrogenation catalysts // *Journal of Catalysis*. Elsevier, 2022. Vol. 405. P. 60–73.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.92

Опытная комбинированная биоэнергетическая установка

И.Г. Жиганов¹, В.В. Кувшинов¹, А.В. Никоненко¹, А.Д. Касницкий¹,
В.А. Березняк¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, zhiganov80@gmail.com, VVKuvshinov@sevsu.ru

Статья поступила 08.09.2023 г.; после доработки 11.09.2023 г.

Аннотация

Биоэнергетические установки позволяют не только сокращать использование природного газа, но и являясь CO₂ – нейтральными способствуют значительному улучшению экологической составляющей. Поэтому биоэнергетика, используемая для различных потребителей, представляет интерес как с точки зрения энергетики, так и экологии.

Ключевые слова: биоэнергетическая установка, солнечная энергетика, система теплоснабжения, биогазовая система, теплонасосная установка, агропромышленный комплекс.

Experimental combined bioenergy installation

I.G. Zhiganov, V.V. Kuvshinov, A.V. Nikitenko, A.D. Kasnitsky,
V.A. Bereznyak

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, zhiganov80@gmail.com,
VVKuvshinov@sevsu.ru

Received 08.09.2023 y.; received in final form 11.09.2023 y.

Abstract

Bioenergy plants not only reduce the use of natural gas, but also, being CO₂ neutral, contribute to a significant improvement in the environmental component. Therefore, bioenergy used for various consumers is of interest from both an energy and environmental point of view.

Key words: bioenergy installation, solar energy, heat supply system, biogas system, heat pump installation, agro-industrial complex.

Введение

Биоэнергетические установки позволяют не только сокращать использование природного газа, но и являясь CO₂ – нейтральными способствуют значительному улучшению экологической составляющей. Поэтому биоэнергетика, используемая для различных потребителей, представляет интерес как с точки зрения энергетики, так и экологии [1].

Биогаз – возобновляемый органический вид топлива, полученный путем анаэробного (без

доступа воздуха) микробиологического сбраживания органических отходов деятельности. На сегодняшний день во всем мире существует тенденция к замене органического топлива на более экологически чистые виды топлива из возобновляемых источников энергии. В частности, в аграрных районах, которые наиболее удалены от ТЭЦ и постройка котельных и подвод газопроводов с экономической точки не выгоден, наиболее перспективным видом топлива, может являться

биогаз [2].

Весь процесс получения метана из органических отходов основан на работе следующих штаммов бактерий: мезофильных, с температурой жизнедеятельности 30 – 40 °С и термофильных, с температурой 50 - 60 °С.

подавляющее большинство метаногенерирующих бактерий достигает максимальной скорости роста при температуре +30...+40 °С.

Имеются также термофильные виды с максимальной температурой от +50 до +85 °С. Оптимум развития для термотолерантной группы +40...+42 °С. В практике обычно применяется два режима метаногенеза:

1. мезофильный;
2. термофильный.

В последнее время находят применение и термотолерантный - промежуточный. Однако выбор температурного режима процесса метаногенерации при создании и эксплуатации биогазовых установок диктуется не только скоростью биохимической активности процесса, но и требованиями качества конечных продуктов, выхода биогаза, его состава, экологическими и экономическими факторами [3].

Биохимические процессы сбраживания идут в три стадии, причем каждая обеспечивается собственной группой анаэробных микроорганизмов [4].

На первой стадии происходит разложение нерастворимых биологических материалов, (целлюлозы, полисахаридов, жиров), которые расщепляются на углеводы и жирные кислоты. В работающем биогазогенераторе этот процесс происходит при температуре 25 °С за сутки.

На второй стадии кислотопродуцирующие бактерии, образуют преимущественно уксусную и пропионовую кислоты за то же время.

На третьей стадии бактерии, образующие метан, медленно, примерно в течение 14 суток при температуре 30 °С, полностью сбраживают исходные продукты, вырабатывая биогаз с составом ~ 70% CH_4 и ~ 30 % CO_2 с малыми примесями H_2 и, возможно, H_2S .

Метанобразующие бактерии чувствительны к величине pH: условия в среде должны быть среднекислыми (pH от 6,6 до 7,0) и, конечно, не ниже pH = 6,2. Требуется определенное содержание азота и фосфора около 10 на 2% массы сухого сбраживаемого материала соответственно. Золотое правило обеспечения успешного сбраживания — поддерживать постоянные условия по температуре и подаче

исходных материалов.

Попытка ученых разработать биогазовые технологии с учетом всех перечисленных особенностей процесса метаногенерации привела к возникновению разнообразных конструкций микробиологических реакторов [5], позволяющих перерабатывать биомассу любой концентрации и любого состава. Разработка биогазовых технологий должна быть основана на следующих принципах:

- фундаментальные знания сложнейшего биологического процесса метаногенерации органических веществ растительного и животного происхождения, включая достижения микробиологии, биохимии, молекулярной биологии, биотехнологии;
- особенности механического состава используемого сырья;
- конструкторское решение оборудования, направленное на снижение металлоемкости и энергоемкости;
- экономические, экологические и энергетические особенности конкретного региона.

Постановка задачи

По данным [6] в России осуществляется программа реализации биогазовых технологий с учетом ее возможностей по сырьевой базе, находящейся под патронажем Управления топливно-энергетического комплекса Миннауки России. Первым этапом этой программы стала разработка эффективных биогазовых технологий для всех видов имеющихся органических отходов.

Эти технологии можно разделить на три большие группы [7] (классификация ведется по механическим особенностям субстрата):

- технологии по обработке «супержидких» стоков (в основном перерабатывающей промышленности: молочной, сахарной, консервной и др.) при влажности последних 98-99%;
- технологии по обработке жидких отходов при влажности 85-96%;
- твердофазные технологии по обработке отходов с влажностью менее 85%.

Первая группа технологий базируется на использовании:

- анаэробных контактных реакторов с отстойником и рециркуляцией биомассы; принцип работы седиментация бактериальных гранул и контакт поступающего сырья с образующимся

активным илом; минимальное время удерживания субстрата в реакторе 4-6 ч. (для стоков сахарной промышленности);

- реактора с неподвижным слоем ила и поступлением сырья в реактор снизу вверх, или реактора с восходящим слоем (реактора Леттиниги); его работа основана на спонтанном получении бактериальных гранул, образующих плотный слой на дне реактора. Сточные воды, содержащие растворимые органические вещества, переходят через относительно плотную зону бактериальных гранул, минимальное время удерживания субстрата 4–24 ч.;
- анаэробного фильтра, или затопленного фильтра Мак-Картти, основанного на иммобилизации метаногенных сообществ на неподвижных носителях, через которые пропускаются низко концентрированные жидкие стоки;
- реакторов с псевдоожиженным и увеличенным слоем бактериальной массы, иммобилизированной в мелких инертных частицах, которые сильным потоком подающейся в реактор жидкости удерживают во взвешенном состоянии, время удерживания 1 ч., производительность до 30 м³ биогаза в сутки на 1 м³ реактора;
- реактора с неподвижно закрепленной подающей пленкой; этот реактор сконструирован с учетом недостатков анаэробного фильтра; носителем для бактерий является неподвижно закрепленная пленка, избыток бактерий и твердых частиц уносится потоком жидкости.

Указанные технологии позволяют значительно повысить скорость обработки (до 10 раз) субстратов, что приводит к уменьшению объемов реакторов соответственно капиталовложений и эксплуатационных расходов [8]. Процесс осуществляется непрерывно, температура ферментации от 18 до 55°C, время удерживания биомассы от нескольких часов до нескольких суток, нагрузка по органическому веществу на единицу объема рабочего реактора повышается с нескольких килограммов в сутки до нескольких десятков килограммов. Выход биогаза возрастает с нескольких кубометров до 20-30 м³ на 1 м³ реактора в сутки. Преимуществом этих технологий являются высокие скорости обработки, снижение капитальных затрат. В последние годы эти технологии использовались для создания биостановок в Крыму [9-10].

Вторая группа технологий основана на использовании классической технологии полного

вытеснения субстрата (рис. 1).

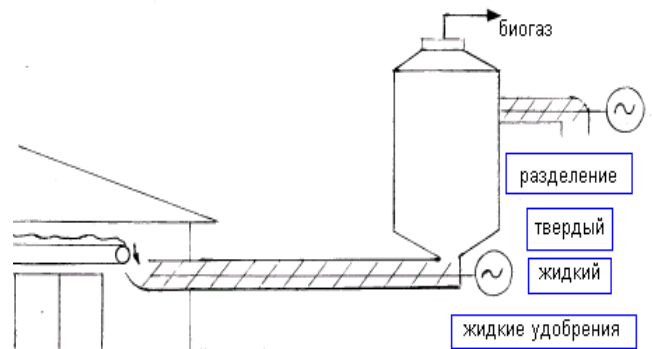


Рис. 1. Технология полного вытеснения («классическая»)

Они могут быть использованы при обработке субстратов с влажностью от 85 до 96%. Процесс может осуществляться периодически, полупериодически или непрерывно. Температура ферментации от 15 до 55°C. Время удерживания от 3 до 30 суток. Выход биогаза минимальный – 1 м³/м³ реактора в сутки, максимальный – 3-5 м³/м³ реактора в сутки. Объемы реакторов от 1 м³ до 10 тыс.м³. Недостатками могут быть возможное образование «корки», необходимость перемешивания и большой расход энергии на поддержание температуры процесса [11].

Более эффективная рециркуляционная технология разработана Т. Я. Андриюхиным (рис. 2). Основой которой является *возврат жидкой фазы на разбавление*.

Технология используется при обработке концентрированных, вязких органических отходов (например, куриного помета), требующих разведения для создания оптимальных физико-химических условий процесса. Как и в предыдущем случае, процесс периодический, полупериодический, непрерывный. Температура ферментации биомассы от 18 до 55°C. Объемы реакторов от 1 м³ до 10 тыс.м³. Субстрат, имеющий влажность 75-80%, разбавляется рециркулятом до влажности 93-94% и после подогрева до температуры ферментации подается в реактор. Время удерживания биомассы составляет от 5 до 50 суток. Выход биогаза 1 м³/м³ реактора в сутки и более. Преимуществом этой технологии является отсутствие избыточной жидкой фазы. Рассмотренная технология рекомендуется, прежде всего, для обработки отходов птицеводства и внедрена на Октябрьской фабрике Глебовского ППО в Московской области России. Выход биогаза увеличивается до 500-600 м³ с 1 т. навоза (на абсолютно сухое вещество) вместо 200-250 м³/т при

использовании обычной технологии [12].

Технология многостадийной метангенерации разработана на АО «Агромед» (рис. 3). Она основана на разделении природного биологического процесса метангенерации в соответствии с его бактериально-биохимическими особенностями (с целью интенсификации процесса) на стадии: бактериального гидролиза, кислотообра-

зования и метангенерации. Процесс непрерывный, время удерживания биомассы 3-5 суток. Объемы последовательно расположенных реакторов 1:2:4 с повышением температуры 40:45:55°C. В первом реакторе происходит бактериальный гидролиз, во втором – кислотогенный процесс, в третьем – метангенерация.

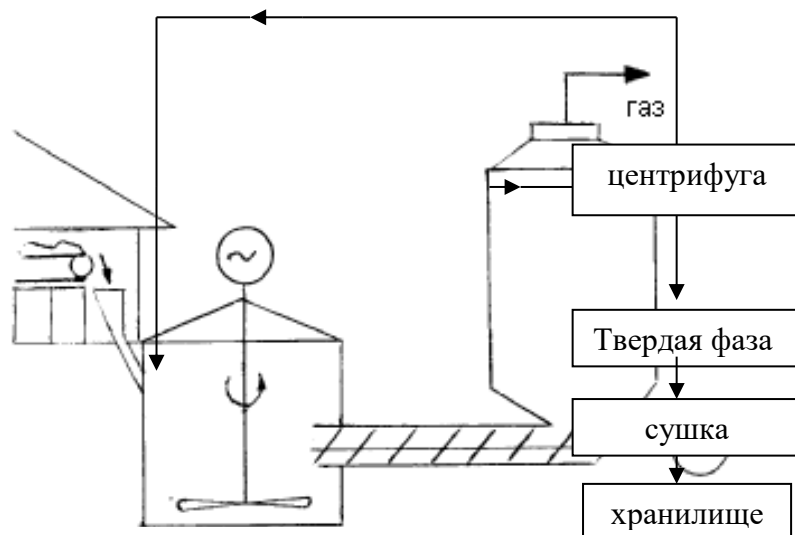


Рис. 2. Технология, разработанная Т. Я. Андриюхиным.

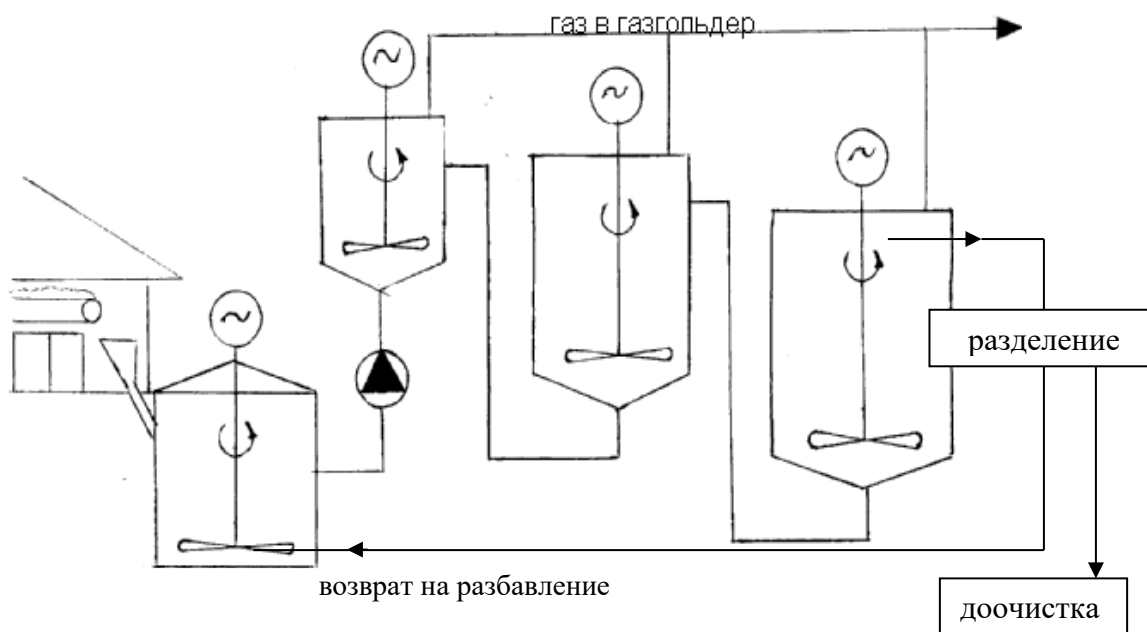


Рис. 3. Технология многостадийной метангенерации

К третьей группе технологий относится технология твердофазной метангенерации, разработанная в Институте биохимии имени А.Н. Баха РАН совместно с академией коммунального хозяйства для обработки обезвоженных осадков сточных вод (рис. 4).

Детальные исследования, проведенные в

Институте биохимии по научным основам твердофазной метангенерации, показали, что эти процессы могут активно протекать вплоть до концентрации твердой фазы 10%.

Твердофазный процесс может быть и периодическим. Температура ферментации составит от 18 до 55°C. Время удерживания от 5 до 30 суток. Выход биогаза составит от 0,5 до 1,5 м³/м³

реактора в сутки. Загрузка и выгрузка осуществляется с помощью шнеков. При ферментации субстрата необходимо обеспечить полное его перемешивание. Преимуществом этого процесса

является отсутствие дополнительной воды, отсутствие коркообразования, уменьшение объемов биореакторов и, соответственно, капитальных затрат. Недостатками могут быть снижение газоотдачи и увеличение времени удерживания.

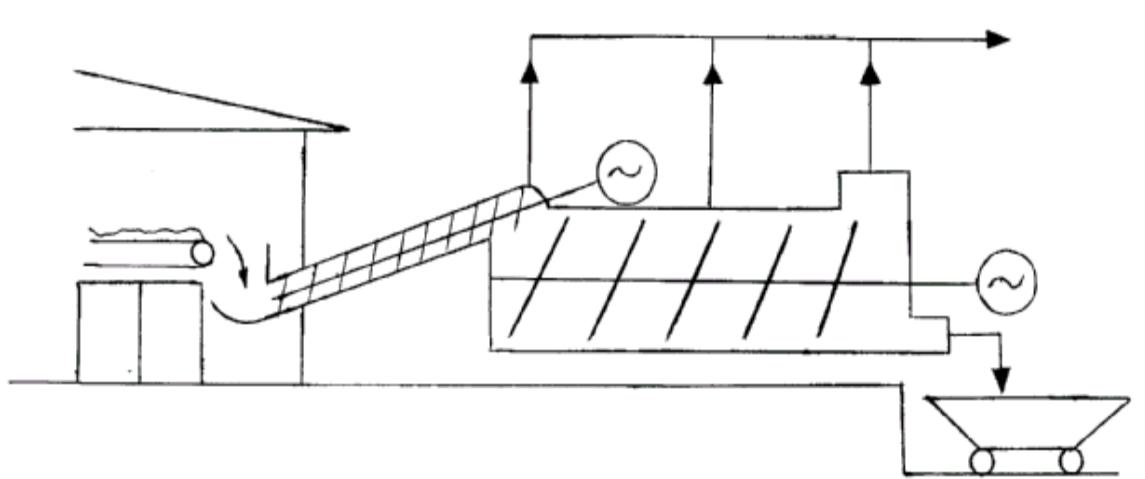


Рис.4. Технология твердофазной метангенерации (при влажности субстрата менее 80%). Обезвоженные осадки коммунальных стоков. Влажность менее 80 %.

Результаты исследования

В результате проведенной работы была исследована практическая возможность обеспечения индивидуальных потребителей биогазом путем использования комбинированной солнечно-биоэнергетической установки.

В ходе работы была исследована практическая возможность использования тепловых установок прямого преобразования потока солнечной радиации и биогазовых установок с повышенной эффективностью при оснащении их гелиоколлекторами. На основе экспериментальных данных исследована возможность использования предложенных установок в агропромышленных комплексах.

Задача анализа биогазовых систем состоит в изучении свойств и эффективности системы в зависимости от структуры технологических связей между отдельными ее объектами, а также от конструктивных и технологических параметров системы и параметров технологических режимов биогазовых установок.

К конструктивным параметрам относятся: объем биогазовой установки, доза загрузки биомассы, количество загрузок, метод перемешивания и термостатирования и геометрические размеры участвующих в этом аппаратах.

Структурная схема предложенной комбинированной биоэнергетической системы изображена на рис. 5.

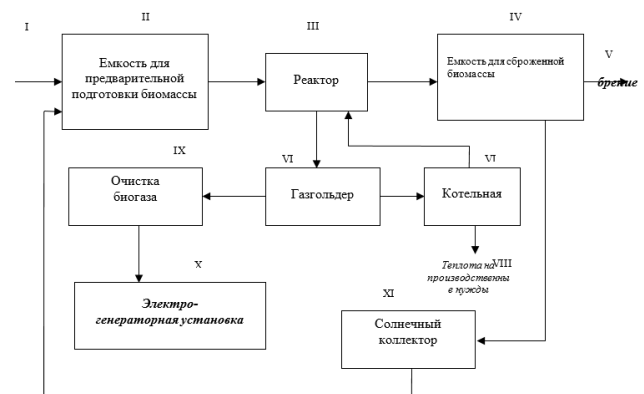


Рис. 5. Биоэнергетическая система

Технологическими параметрами аппаратов являются коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи от биомассы к стенке реактора и от теплообменника к биомассе, скорость вращения мешалки, интенсивность перемешивания. Параметры технологических режимов биогазовых установок – это рабочая температура брожения биомассы, давление в реакторе, длительность брожения, объемный суточный расход биомассы.

Основная задача анализа биореакторов заключается в том, чтобы математически связать характеристику состояния системы (значения выхода метана) с параметрами и характеристиками состояния биореактора в зависимости от структуры технологических связей между ними в биоэнергетической системе.

Математическая постановка задачи анализа

биоэнергетических систем формируется следующим образом: необходимо определить

$$\bar{V}_{\text{вых}} = f(\bar{T} \cdot \bar{P} \cdot \bar{pH} \cdot \bar{K} \cdot \bar{D} \cdot \bar{G}),$$

$$\Psi = \psi(\bar{T} \cdot \bar{P} \cdot \bar{pH} \cdot \bar{K} \cdot \bar{D} \cdot \bar{G}),$$

где $\bar{T}$ - вектор температур выбранных режимов сбраживания; $\bar{P}$ - вектор давления в реакторе; $\bar{pH}$ - вектор кислотности биомассы; Ψ - критерий эффективности биоэнергетических систем; $\bar{V}_{\text{вых}}$ - вектор выхода метана; $\bar{K}$ - вектор заданных температур входных потоков; $\bar{D}$ - вектор заданных или рассчитываемых технологических параметров; $\bar{G}$ - заданная структура технологических связей (технологическая топология) биоэнергетических систем.

С математической точки зрения задача анализа биоэнергетических систем сводится к решению многомерных нелинейных систем уравнений с использованием различных численных методов, в частности методов нелинейного программирования.

На сегодняшний день очень важной задачей при проектировании биогазовых установок создание более совершенного типа технологии. В большинстве случаев биогазовые установки становились нерентабельными из-за больших эксплуатационных затрат, связанных с подогревом и измельчением биомассы.

Задачей оптимизации является поиск экстремума эффективности или оптимизации. Критерий оптимизации может быть:

- технологическим,
- термодинамическим,
- экономическим.

Если произвести анализ важности критериев, то, несомненно, на первом месте окажется экологический, т. к. оптимизируя технологию или энергетический баланс системы, мы в конечном итоге стремимся уменьшить затраты.

Существует два вида экономического критерия: приведенные затраты на строительство и функционирование биогазовой установки, а также приведенный доход и прибыль.

Приведенные затраты могут быть определены по следующей формуле:

$$\Pi = E \cdot C + \sum c_i \cdot Q_i \cdot \Theta_i,$$

где E - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; K - капитальные затраты, грн; c_i - стоимость энергетических потоков, участвующих в процессе анаэробного сбраживания, грн/Вт (грн/Дж); Q_i - рас-

ход энергоносителя, Вт·ч (Дж/час); Θ_i - продолжительность годовой эксплуатации биоэнергетической системы, час/год.

Еще одним показателем экономической эффективности является приведенный доход

$$D_{np} = \sum_i C_i \cdot B_i - \Xi - E_n \cdot K_t,$$

где C_i - отпускная цена на выходной продукт биоэнергетической системы (биогаз, высококачественные удобрения); B_i - годовой объем выпуска и реализации i -го вида конечной продукции; Ξ - суммарные эксплуатационные затраты, грн/год; E_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; K_t - производственные фонды, грн.

В качестве термодинамического критерия оптимизации могут применяться приведенные затраты через затраченную на процесс энергию:

$$\Pi_w = E_n \cdot \kappa_w \cdot W + \frac{W \cdot c_q \cdot \Theta}{\eta_t}$$

где W - количество энергии затраченное в процессе, кВт·ч; κ_w - удельные капитальные вложения, отнесенные к затраченной энергии, грн./(кВт·ч); E_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; c_q - стоимость единицы теплоты, грн./(кВт·ч); Θ - количество часов работы биоэнергетической системы, час/год; η_t - термодинамический КПД процесса.

Термодинамический КПД биоэнергетических систем показывает долю биогаза, которая остается после покрытия ним энергетических потребностей

$$\eta_t = 1 - (Q_{ж} + Q_n - \Delta Q^{экз}) / (Q_n \cdot V_{бг} \cdot \eta_k),$$

где $Q_{ж}$ - энергия, расходуемая на подогрев биомассы, кВт; Q_n - потери теплоты в окружающую среду через ограждения, кВт; $\Delta Q^{экз}$ - энергия экзотермической реакции ферментации, кВт; Q_n - низшая теплота сгорания биогаза, кДж/м³; $V_{бг}$ - объемный выход биогаза, м³/сут.; η_k - коэффициент, характеризующий потерю теплоты в котлах или при производстве электроэнергии, если не известен вид сжигания, то η_k принимается 0,9.

Для проведения анализа оптимизации структуры технологических и энергетических потоков были построены, соответственно, топологический параметрический потоковый граф (рис. 6).

Построенные таким образом потоковые графы и матрицы инициаций являются основой для нахождения оптимальных значений параметров, в зависимости от выбранного критерия

оптимизации. Нахождение оптимальных значений происходит путем сканирования матрицы инициаций графа и определения булевой переменной на своем пути с помощью ЭВМ в каждой узловой точке.

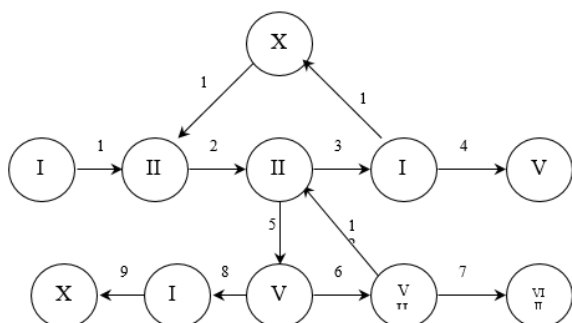


Рис. 6. Экзегетический потоковый граф

Выводы

Предложенные солнечные биоэнергетические системы позволяют использовать в составе существующих систем агропромышленных комплексов, при этом значительно сокращается использование органического топлива. Расчеты, выполненные по объемам сэкономленного природного газа, показывают, что использование биогаза существенно сократит финансовые затраты агропромышленных объектов.

Предварительные исследования использования биогазовых установок в Крымском регионе показывают, что их энергетические параметры позволяют практическое их использование для обеспечения сельского хозяйства практически по всей территории района.

Работы по исследованию возможностей обеспечения объектов тепловой энергией и биогазом, позволяют разрабатывать и внедрять проекты использования комбинированных солнечных биоэнергетических систем и для теплоснабжения объектов, расположенных в различных районах Республики Крым.

Список литературы

1. Энергетическая утилизация отходов - приоритетное направление создания энергоэффективной экономики/ Зайченко В.М., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Горлов А.А., Жиганов И.Г. // В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2021. сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Севастополь, 2021.

С. 235-239.

2. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. - Metallurgy, 1974. - 264 с.
3. Голубовская Э.К. Биологические основы очистки воды. Учебное пособие для студентов строительных специальностей вузов. — М.: Высшая школа, 1978. — 268 с.
4. Повышение эффективности работы комбинированных биоэнергетических установок / Жиганов И.Г., Кувшинов В.В., Смирнов В.В., Исса Х.А., Аль-Малики М.Н. // Естественные и технические науки. 2023. № 1 (176). С. 163-165.
5. Семенов И.В, Проектирование биогазовых установок. Изд. Мрия, Сумы, 1996.
6. Проблемы развития биоэнергетики в России / Зайченко В.М., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Жиганов И.Г., Ильин А.А. // Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 3. С. 30-34.
7. Дрейпер Н., Смит Р. Прикладной регрессионный анализ. -М.: Статистика, 1973. -392 с.
8. Земсков В. И. Александров И. Ю. Проектирование технических систем производства биогаза в животноводстве: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань» 2017. — 312 с.
9. Потенциал развития тепловой солнечной энергетики для нужд коммунального хозяйства / Бордан Д.Ф., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Олейников А.М., Гхашим М. // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7. № 1. С. 46-52.
10. Методы оптимизации технологических режимов комбинированных систем: биогазовых установок с солнечными коллекторами / Жиганов И.Г., Кувшинов В.В. // сборнике: Перспективные технологии и материалы. Материалы Международной научно-практической конференции. Севастополь, 2022. С. 257-260.
11. Оптимизация критериев тепловой устойчивости при работе биоэнергетических реакторов / Жиганов И.Г., Кувшинов В.В., Гусева Е.В., Гхашим М.М. // Естественные и технические науки. 2023. № 2 (177). С. 161-163.
12. Кафаров В.В. Основы массопередачи. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1972. — 496 с.

References

1. Energy recycling of waste is a priority direction for creating an energy-efficient economy / Zaichenko V.M., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Gorlov A.A., Zhiganov I.G. // In the collection: Environmental, industrial and energy safety - 2021. collection of articles based on materials from the international scientific and practical conference. Sevastopol, 2021. pp. 235-239.
2. Gorsky V.G., Adler Yu.P. Planning of industrial experiments. - Metallurgy, 1974. - 264 p.

3. Golubovskaya E.K. Biological basis of water purification. A textbook for university students of construction specialties. - M.: Higher School, 1978. - 268 p.
4. Increasing the efficiency of combined bioenergy plants / Zhiganov I.G., Kuvshinov V.V., Smirnov V.V., Issa Kh.A., Al-Maliki M.N. // Natural and technical sciences. 2023. No. 1 (176). pp. 163-165.
5. Semenenko I.V., Design of biogas plants. Ed. Mriya, Sumy, 1996.
6. Problems of bioenergy development in Russia / Zaichenko V.M., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Zhiganov I.G., Ilyin A.A. // Energy installations and technologies. 2020. T. 6. No. 3. P. 30-34.
7. Draper N., Smith R. Applied regression analysis. - M.: Statistics, 1973. -392 p.
8. Zemskov V.I. Aleksandrov I.Yu. Design of technical systems for biogas production in livestock farming: Textbook. – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2017. – 312 p.
9. Potential for the development of thermal solar energy for the needs of municipal services / Bordan D.F., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Oleinikov A.M., Ghashim M. // Energy installations and technologies. 2021. T. 7. No. 1. P. 46-52.
10. Methods for optimizing technological modes of combined systems: biogas plants with solar collectors / Zhiganov I.G., Kuvshinov V.V. // collection: Advanced technologies and materials. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Sevastopol, 2022. pp. 257-260.
11. Optimization of thermal stability criteria during the operation of bioenergy reactors / Zhiganov I.G., Kuvshinov V.V., Guseva E.V., Ghashim M.M. // Natural and technical sciences. 2023. No. 2 (177). pp. 161-163.
12. Kafarov V.V. Fundamentals of mass transfer. Ed. 2nd, revised and additional Textbook for universities. - M.: Higher School, 1972. - 496 p.

УДК 620.92

Возможности использования возобновляемой энергетики для обеспечения портовой инфраструктуры

И.С. Ивантеев¹, А.С. Жильцов¹, Н.В. Бахтина¹,
В.П. Коломийченко, И.Д. Артеменко¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, ivantyeyev@gmail.com

² Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище им. П.С. Нахимова (Севастополь)

Статья поступила 28.08.2023 г.; после доработки 29.08.2023 г.

Аннотация

Использование возобновляемой энергетики для обеспечения морских портовых сооружений представляет интерес как с точки зрения энергетики, так и экологии. Возможность использования ветровых и солнечных электростанций позволяет в короткое время нарастить генерирующие мощности и сократить транспортировку органического топлива.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, фотоэлектрическая панель, электроснабжение морского порта, солнечная электростанция, портовые сооружения.

Opportunities for using renewable energy to provide port infrastructure

I.S. Ivanteev, A.S. Zhiltsov, N.V. Bakhtina,
V.P. Kolomiychenko, I.D. Artemenko

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia, ivantyeyev@gmail.com
Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P.S. Nakhimov (Sevastopol)

Received 28.08.2023 y.; received in final form 29.08.2023 y.

Abstract

The use of renewable energy to power seaport facilities is of interest from both an energy and environmental point of view. The possibility of using wind and solar power plants makes it possible to quickly increase generating capacity and reduce the transportation of fossil fuels.

Key words: wind power plant, photovoltaic panel, seaport power supply, solar power plant, port facilities.

Введение

Веком электричества можно смело считать 20 век. Современный мир немислим без электроэнергии. Окружающий нас мир неразрывно связан с электричеством. Такое повсеместное использование электроэнергии можно считать результатом внедрения электричества в научно-технический прогресс. Использование ее в силу своих физических свойств во всех сферах жизни

человека, что привело к бурному развитию электроники, систем связи, применение ЭВМ, разнообразных систем управления и как следствие этого резкий скачок роста генерирующих мощностей за относительно небольшой промежуток времени [1].

Наиболее ярким примером развития технологий в электротехнике является освещение, от газовых ламп до светодиодного освещения. Освещение позволило человеку осуществлять

деятельность в любое время суток, и любом помещении. На этом примере можно четко увидеть, как освещение превратилось из диковинки в нечто повседневное и обыденной.

Рассмотрим вопрос электроэнергии шире, отойдем от бытового контекста и попробуем посмотреть в какой сфере нет электроэнергии. Без преувеличения можно сказать, что в любом производстве будь то тяжелая промышленность или легкая, в любой сфере услуг, сельском хозяйстве, в военной сфере, науке и т. д. присутствует электроснабжение в том или ином виде.

С экономической точки зрения стоимость затраченной электроэнергии на производство каких-либо товаров или услуг, закладывается в конечную стоимость продукции, как в производственной, так и сфере услуг. Следовательно, чем ниже энергетическая эффективность энергопроизводства, тем выше расходы на себестоимости электроэнергии, которая ведет к повышению тарифов для потребителей.

Отсюда вытекает что залогом цивилизованного развития страны является электроснабжение. Более того электроэнергия становится товаром между соседними странами и одновременно с этим и рычагом влияния на соседние страны и не только, например корпорация «Росатом», занимается строительством и обслуживанием Атомных электростанций по всему миру. Роль электроэнергии в жизни человека и государства стало трудно переоценить.

Поскольку электроэнергетическая отрасль является частью топливно энергетической комплекса ТЭК, то энергообеспеченность становится стратегической задачей. Очевидно, что обеспеченность ресурсами и развитие ТЭК имеет государственное значение. Основные положения и направления, проводимые государством изложены в «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» [2].

Согласно этому документу можно отдельно выделить в области энергетики в такие положения как Электроэнергетика и теплоснабжение, Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), Энергосбережение и повышение энергоэффективности. Выделим наиболее значимое по каждому из пунктов для создания картины ситуации в целом.

Согласно стратегии [2], 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. Неоправданно низка доля использования местных видов топлива (торф, отходы лесной промышленности и сельского хозяйства и твердые бытовые отходы) в региональных энергетических балансах.

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. 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.

Постановка задачи

Электроэнергетическая отрасль России –

сложнейший народнохозяйственный комплекс, который состоит из нескольких под отраслей, объединенных ранее под эгидой единственной компании – Единая энергетическая система России. ОАО РАО «ЕЭС России» (Российское акционерное общество «ЕЭС России») просуществовало до 1 июля 2008 года и являлось высшим уровнем в административно-хозяйственной структуре управления электроэнергетической отраслью Российской Федерации. В целях реформирования и демонизации отрасли с 1 июля 2008 года РАО ЕЭС России распалось на 23 независимые компании, включая государственные естественно-монопольные компании (АО «Концерн Росэнергоатом», ПАО «РусГидро») («Федеральная гидрогенерирующая компания — РусГидро» в части электросетей Дальнего Востока) и ПАО «Россети») остальные представляют собой частные (приватизированные) генерирующие, сетевые и сбытовые компании.

В настоящее время генерирующие и сбытовые компании отделены и от электросетевых.

После реорганизации ОАО РАО «ЕЭС России» генерацией занимались: государственная компания АО «Росэнергоатом», ОАО «РусГидро», 7 оптовых генерирующих компаний (ОГК) и 14 территориальных генерирующих компаний (ТГК). Государственные электросетевые активы были переданы в О «Холдинг МРСК» и ОАО «Федеральная сетевая компания» (в дальнейшем вошли в холдинг ПАО «Россети»). Сбытом занимался целый ряд крупных независимых энергосбытовых компаний. В настоящее время Россия занимает четвертое место в мире по объему производства электроэнергии после Китая, США и Индии (рис. 2 далее), опережая Японию, которой до недавнего времени уступала [3].

Выработка электроэнергии электростанциями ЕЭС России в 2022 году составила 1 121,5 млрд кВт·ч [4]. Потребление электроэнергии в 2022 году составило 1 106,3 млрд кВт·ч. Фактическая и приведенная к температурным условиям 2021 года динамика потребления электроэнергии в объединенных энергосистемах и ЕЭС России представлена в таблице 1.

Таблица 1. Динамика потребления электроэнергии в объединенных энергосистемах

Энергосистема	Потребление электроэнергии, млрд кВт·ч			Динамика потребления, %	
	2022 год	2021 год	Отклонение (+/-) от 2021	Фактическая	Приведенная к температурным условиям 2021 года
ЕЭС РОССИИ	1 106,3	1 090,4	15,9	1,5	1,8
ОЭС Центра	257,3	256,3	1,0	0,4	0,9
ОЭС Средней Волги	110,9	111,4	-0,6	-0,5	0,2
ОЭС Урала	260,8	256,7	4,2	1,6	1,9
ОЭС Северо-Запада	97,1	97,6	-0,4	-0,4	0,1
ОЭС Юга	111,0	108,3	2,8	2,6	3,1
ОЭС Сибири	224,7	217,3	7,3	3,4	3,4
ОЭС Востока	44,5	42,9	1,6	3,8	3,9

Проведенная реформа отрасли, высокие производственные и финансовые результаты, международная интеграция – все это свидетельствует о явном благополучном состоянии электроэнергетической отрасли Российской Федерации.

Исходя из выше описанного, и ситуации, Россия в настоящее время и ближайшее будущее будет является страной с сырьевой моделью экономики, для которой жизненно важно будет развитие новых месторождение полезных ископаемых на Дальнем Востоке, как для нужд внутреннего рынка так и экспорта. Для разработки с последующей добычей полезных ископаемых необходима развитая транспортная сеть, использование которой позволит перемещать сырье от мест месторождения до мест производств или

продажи за границу, вследствие чего резко возрастает роль морских портов.

Переориентированный растущий грузопоток не только угля, но и иных товаров, на страны Азии создает непосильную нагрузку на инфраструктуру РЖД, поскольку морской транспорт оказался неспособен обеспечить возросший грузопоток (рис. 1).

Морской транспорт нуждается в серьезной комплексной модернизации. На данный момент можно выделить ряд острых проблем развития портового хозяйства в Приморском крае. Это ограничения по развитию портовой и припортовой инфраструктуры. Расположение порто в границах населенных городов (Владивосток, Находка) привело к невозможности их дальней-

шего развития — строительства портовой инфраструктуры, реконструкции подъездных железнодорожных и автомобильных путей, создания необходимых логистических центров. В силу того, что порты не являются обособленными объектами, обеспечивающими транспортировку грузов, существенное влияние оказывают другие звенья транспортно-логистической цепочки. Например, тарифы на железнодорожные перевозки, которые влияют как на фактическое функционирование портов, так и на перспективы его дальнейшего развития.

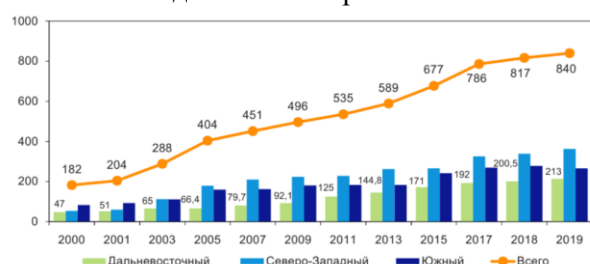


Рис. 1. Грузооборот по морским бассейнам страны, млн т

Очевидно, что совершенствование опорной транспортно-логистической инфраструктуры Приморского края для осуществления бесперебойного транзита товаров через территорию региона требует увеличения пропускной способно-

сти портов и железнодорожных комплексов, развития сети автомобильных дорог и воздушного сообщения для обеспечения мобильности населения и транспортировки грузов. Сегодня порт не является единым предприятием, как это было в прошлом. Погрузочно-разгрузочные и другие работы в портах выполняют разные стивидорные и прочие самостоятельные компании. А это существенно усложняет управление производственным процессом, в частности, взаимодействие с железной дорогой [6].

Результаты исследований

Согласно «Стратегии развития Арктики до 2035 года», ключевым направлением становится развитие и модернизация всей транспортной системы. Бесперебойное транспортное сообщение становится ключом к широкомасштабному освоению арктических ресурсов и обеспечению социально-экономического роста арктических регионов и Арктической зоны Российской Федерации в целом [5].

Ориентировочный прогноз строительства и реконструкции морских портов на трассе СМП на 2020–2030 и 2050 годы представлен в таблице 2.

Таблица 2. Строительство и реконструкция морских портов на трассе СМП на 2020–2024 и 2030–2025 годы

Порт, регион	Краткая характеристика и обоснование необходимости мероприятия
Мероприятия 1-го этапа (2020–2024 годы)	
Диксон	Строительство угольного терминала в районе мыса Чайка с грузооборотом 10 млн т в год
Нефтяной терминал Таналау в устье реки Енисей	Строительство морского порта для перевалки нефти мощностью до 5 млн т в год и грузов, необходимых для обустройства и эксплуатации нефтегазовых Пайяхского и Север-Пайяхского месторождений.
Мурманск	В рамках первого этапа планируется строительство терминала Лавна для приема угля, так называемого экологического терминала для отходов судов общей мощностью тридцать пять тысяч мЗ, Арктической гавани. Кроме того, предполагается реконструкция пирса, двух районов грузового порта, а также самого здания морского вокзала. В результате увеличение грузооборота должно составить не менее 18–20 т.
Сабетта, Ямало-Ненецкий АО	Строительство: подходного канала и морского порта в районе пос. Сабетта мощностью 16,5 млн т; морской порт в районе пос. Мыс Каменный мощностью до 8,5 млн т в год для отгрузки нефти Новопортовского месторождения; морской порт СПГ и стабильного газового конденсата терминала «Ворота Арктики» 21,6 млн т в год.
Певек, Чукотский АО	Пасширение территории морского порта Певек для освоения Баимской рудной зоны и увеличения объема грузов до 2 млн т. В год к 2026 году.
Петропавловск-Камчатский	Привлечение транзитных грузов, строительство контейнерного терминала, рост грузового потока может составить 7–10 млн т ежегодно к 2025 году.
Мероприятия 2-го этапа (2030–2035 годы)	
Архангельск	Реконструкция и строительство объектов порта, создание проходной глубины на канале 12 м для пропуска судов с осадкой до 10,5 м, обеспечение безопасности мореплавания, повышение пропускной способности причалов, реконструкция терминалов и акватории для обслуживания рыбопромыслового флота, строительство нового грузового района и реконструкция подходного канала, глубоководного района «Северный» в

	северной части порта для перевалки угля, минеральных удобрений, контейнеров мощностью 28 млн т в год.
Анадырь, Чукотский АО	Планируется строительство нового причала, который будет расположен в поселке Угольные Копи на берегу Анадырского лимана. Ориентировочная пропускная способность паромно-пассажирского причала составит от 20 до 25 тыс. человек. Кроме того, в планах – реконструкция действующего морского порта.
Беринговский, Чукотский АО	В лагуне Аринай планируется строительство нового угольного терминала, предполагаемая мощность – 15 млн т.
Диксон, Красноярский край	Для обеспечения деятельности гидрографических и аварийно-спасательных судов, призванных заниматься бункеровкой, ремонтом, пополнением запасов, а также ликвидацией разливов нефти, планируется модернизация имеющейся инфраструктуры – портовых сооружений и причалов.
Мурманск	Строительство новых, а также модернизация уже существующих терминалов. Планируемая мощность новых терминалов составляет 35 млн т.
Морской порт Териберка, Мурманская область	Для перевалки сжиженного природного газа в поселке Териберка планируется строительство порта с новым терминалом общей мощностью 30 млн т.
Певек Чукотский АО	Для обеспечения деятельности гидрографических и аварийно-спасательных судов, призванных заниматься бункеровкой, ремонтом, пополнением запасов, а также ликвидацией разливов нефти, планируется модернизация имеющейся инфраструктуры – портовых сооружений и причалов.
Тикси, Республика Саха (Якутия)	Для обеспечения деятельности гидрографических и аварийно-спасательных судов, призванных заниматься бункеровкой, ремонтом, пополнением запасов, а также ликвидацией разливов нефти, планируется модернизация имеющейся инфраструктуры – портовых сооружений и причалов.
Беломорск, Республика Карелия	Для приема судов дедвейтом до 70 т (на первоначальном этапе до 30 тыс. т) планируется строительство нового морского порта. Современный порт будет обладать двумя грузовыми районами, 1-й район – универсальный комплекс мощностью до одного млн тонн, 2-й – угольный комплекс, мощность которого будет достигать восьми млн т.
В перспективе до 2050 года (3-й этап) будет проводиться реконструкция и модернизация следующих портов: Амдерма – Ненецкий АО; Варандей – Ненецкий АО; Витино – Белое море, Мурманская область; Игарка – Красноярский край; Кандалакша – Мурманская область; Новый порт – ЯНАО; Провидения – Чукотский АО; Хатанга – Красноярский край; Эгвекинот – Чукотский АО; Индига и Усть-Кара – Ненецкий АО.	

Предлагается использовать энергию, получаемую от возобновляемых источников энергии в работе портовой инфраструктуры. Целесообразность и актуальность такого подхода в ключе экологии отмечена [7].

Основными потребителями в портах являются электроприводы порталных кранов, установленная мощность которых достигает 80% от суммарной установленной мощности на предприятии. В остальных преобладают машины перегрузочной механизации (до 6%), компрессоры, насосы, вентиляторы, преобразователи (до 6%), освещение (до 5%).

В общем все потребителями можно объединить в две основные группы:

Первая группа — это электрооборудование, которое типичное для большинства предприятий всех отраслей промышленности: электроприводы металлообрабатывающих станков, компрессоров, вентиляторов, насосов, электрические печи, сварочные установки, внутреннее и

внешнее освещение.

Вторую группу составляет большую часть электрооборудования предприятий водного транспорта: электроприводы кранов, перегрузочных машин, машин трюмной, складской и внутривагонной механизации, конвейеров, транспортёров, шлюзовых механизмов, слипов и доков.

В свою очередь, теплоэнергетическое хозяйство промышленных предприятий водного транспорта [8] включает производство или получение извне различных видов энергии, ее распределение между объектами и потребление. К основным видам энергии, используемой на судоремонтных и судостроительных предприятиях, помимо электрической, относятся пар, горячая вода и сжатый воздух.

Пар и горячая вода расходуются на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение. Паровая энергия используется на литье (в литейных цехах), сушку леса, нагрев воды в ваннах и т.д.

На приведение в действие пневматического инструмента, испытание механизмов, работу пневматических подъемных устройств, краскораспылителей и т.д. расходуется сжатый воздух. Пар и горячая вода вырабатываются в производственно-отопительных котельных установках, сжатый воздух — в компрессорных установках. Для обеспечения проведения сварочных работ на судостроительных и судоремонтных заводах используются установки по производству кислорода и углекислоты. В перегрузочной технике (автопогрузчики, краны и т.д.) в качестве первичных двигателей наряду с электрическими широко используются тепловые двигатели, в частности двигатели внутреннего сгорания (ДВС), преобразующие тепловую энергию в механическую.

По виду нагрузки большинство потребителей электроэнергии в портах составляют асинхронные трёхфазные электродвигатели и сварочные установки, работающие в кратковременном или повторнократковременном режиме.

По условию бесперебойности питания потребители электроэнергии в портах большей частью относятся к потребителям II категории, перерыв питания которых допустим на время включения резервного питания.

Доля потребителей I категории, питание которых должно восстанавливаться немедленно (пожарное оборудование, АТС, радиостанции, аварийное освещение), обычно не более (1—1,5)% суммарной установленной мощности всех потребителей; потребители III категории, допускающие перерыв своего питания на время ремонта или замены поврежденного оборудования (гаражи, депо, административные здания, пассажирские павильоны) составляют (15—18)%.

Отсюда следует, наиболее подходящие группы потребителей это II и III категории, в случае с I категорией энергоснабжения возможно в качестве дополнительного резервного источника.

В зависимости от энергетического потенциала местности портовой территории, мощности и типа используемых ВИЭ электростанций следует объём запрашиваемых потребителей II и III категории. Возможна ситуация, в которой целесообразна отдача энергии в сеть для поддержания и улучшения ее качества, путем регулирования реактивной мощности, в силу того что инверторы являются источниками емкостной составляющей, а порт ярко выраженной индуктивной нагрузкой.

Для оценки потенциала использования

ВИЭ, следует определиться с мощностью портовых кранов, ввиду того, что они составляют 80% энергопотребления, можно оценить энергопотребления остальными потребителями.

Порт как производственный объект представляет собой совокупность причалов, специализированных по определенному роду груза/грузопотоке при соответствующих механооборуженности, организации и технологии перегрузочных работ.

Грузопоток в простейшем случае является простым потоком, т. е. число заявок на обслуживание за любой фиксированный интервал времени распределено по закону Пуассона[9]:

$$V_m = \frac{e^{-\lambda} \lambda^m}{m!}, \quad (1)$$

где $m! = 0, 1 \dots m$ — число заявок на обслуживание; V_m — вероятность наличия в системе m заявок; λ — плотность судопотока обслуживания, 1/сут. Порт как система массового обслуживания состоит из обслуживающих элементов, которыми являются причалы. Для успешного функционирования системы необходимо, чтобы число причалов было не меньше приведенной

$$r \leq \rho = \frac{\lambda}{v} \quad (2)$$

плотности судопотока, т. е. где $v = 24 / t_{\text{обр}}$ — средняя интенсивность обработки судов на одном причале при среднем времени обработки судна $t_{\text{обр}}$ (ч; 1/сут). С другой стороны, минимально необходимое число причалов определяется по формуле

$$r_0 = \frac{q}{P_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где $q = Q_r / \Delta$, — среднесуточный грузооборот порта по данному роду груза, т/сут; Q_r — соответствующий навигационный грузооборот, т; T_n — длительность навигации, сут.; $P_{\text{пр}}$ — суточная пропускная способность причала по данному роду груза (т/сут.), определяемая по формуле

$$Q_{\text{пр}} = k S t_{\text{оп}} H_T, \quad (4)$$

где k — количество кранов на причале; S — число смен в сутки; $t_{\text{оп}}$ — оперативное время работы за смену, ч; H_T — средняя техническая часовая производительность крана, т/ч. Для обеспечения оптимальной организации перегрузочного процесса, соответствующей минимальным приведенным затратам на флот и порты, окончательное решение по оборудованию при-

чалов и их количеству должно определяться величиной использования пропускной способности причала τ .

$$\tau = \frac{q}{r \Pi_{\text{пр}}} = \frac{\lambda}{rv}. \quad (5)$$

Иначе говоря, величина τ определяется отклонением минимально необходимого числа причалов τ_0 к действительному числу причалов τ . Установлено что для эффективной эксплуатации большегрузных теплоходов грузоподъемностью 2000 – 5000 т необходимо обеспечить соотношение грузооборота и пропускной способности в следующих размерах: – по лесным причалам 1 : 3; – по причалам навалочных грузов 1 : 5. Если при данном грузообороте $\tau > \tau_{\text{опт}}$, то увеличивают или пропускную способность причала, или количество причалов, или то и другое. В связи с изложенным можно заключить, что количество, грузоподъемность и использование кранов на причале и, следовательно, величина установленной мощности определяются при заданном грузообороте величиной τ . Тогда, выражая среднюю часовую техническую производительность крана (т/ч):

$$H = G_H k_{\text{гр}} m, \quad (6)$$

где m — среднее число циклов крана в час; $k_{\text{гр}}$ — коэффициент использования номинальной грузоподъемности, определяющий вес поднимаемого груза. Используя выражение (6) и (3), можно получить:

$$kG_H = \frac{q}{S \cdot t_{\text{оп}} \cdot k_{\text{гр}} \cdot m \cdot \tau \cdot r}. \quad (7)$$

Введенная ранее величина $P_{\text{уд}}$, которая связывает номинальные грузоподъемности кранов с их установленной мощностью, позволяет записать $P_y = P_{\text{уд}} kG_H$ (установленная мощность) и в итоге получить искомую зависимость:

$$P_y = \frac{P_{\text{уд}} \cdot q}{S \cdot t_{\text{оп}} \cdot k_{\text{гр}} \cdot m \cdot \tau \cdot r}. \quad (8)$$

При умножении левой и правой части последнего выражения на r получается выражение для определения P_y при любом количестве причалов:

$$P_{yr} = \frac{P_{\text{уд}} \cdot q}{S \cdot t_{\text{оп}} \cdot k_{\text{гр}} \cdot m \cdot \tau}. \quad (9)$$

Поскольку величины s , $t_{\text{оп}}$, $k_{\text{гр}}$ и m являются нормативными, то можно записать:

$$P_{yr} = \frac{\vartheta \cdot q}{\tau}, \quad (10)$$

где $J = (P_{yr} q) / S \text{ кгp m t op}$ — определяет технологическое использование крана на определенном роде груза. Выражение P_{yr} (10) дает величину суммарной установленной мощности. По этой величине можно определить число кранов соответствующей грузоподъемности, ориентируясь на ближайшую большую суммарную мощность.

Основным источником для энергоснабжения портовой инфраструктуры предлагается использовать солнечную и ветровую энергию. По выражениям (1-10) определяется мощность необходимых ветроэлектрических установок (ВЭУ) и солнечных фотоэлектрических панелей для электроснабжения портовых сооружений и техники [10].

ВЭУ устанавливаются непосредственно на территории акватории в местах мелководья, на молах или на отмелях. Ветровой поток в таких местах имеет высокие мощностные характеристики, а затенение практически исключено [11]. При этом на офшорной морской территории постоянство ветра имеет практически равномерное распределения во времени, т. е. ветровой поток будет всегда обеспечивать энергией ветроэлектрические генераторы [12].

Солнечные установки можно распределять по кровлям сооружений и на незанятой территории порта. При этом можно использовать как фотоэлектрические преобразователи, так и тепловые коллекторы для нагрева теплоносителя. Солнечные панели способны генерировать необходимое количество электроэнергии, а гелиоколлектора обеспечивать горячим теплоносителем портовые сооружения. Коэффициент преобразования тепловых установок значительно выше, чем у фотомодулей, поэтому для нагрева целесообразнее использовать гелиоколлектора [13].

Выводы

Обеспечение портовой инфраструктуры является одной из основных задач морской энергетики для всего мира. Для энергоснабжения припортовых сооружений тратится огромного количества органического топлива, которое расходуется электростанциями и котельными обеспечивающими инфраструктуру. При этом доставка топлива для многих портов имеет значительные проблемы, связанные как с их удалением, так и объемами перевозок. При этом расположение многих мировых портов испытывает трудности, связанные с нехваткой свободных генерирующих мощностей. Обеспечение тепловой и электрической энергией портовой инфраструктуры с

использованием возобновляемых источников энергии позволяет избежать выше указанных проблем.

Оснащение морских сооружений энергетическими установками на основе ВИЭ позволяет снизить нагрузку на перевозки значительных объемов топлива, необходимого для нужд морского порта. Использование ветровых и солнечных установок позволяет в короткое время увеличить генерирующие мощности для морской инфраструктуры портов.

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. М.В. Полканов. Значение электроэнергетики в развитии России. — Омский вестник №3(32), 2006— С38
2. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года.
3. В.Г. Королев. Современные особенности и состояние электроэнергетической отрасли РФ — «Инновации и Инвестиции» №10, 2020 — С215-219.
4. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2022 году.// Системный оператор единой энергетической системы.
5. Е.П. Башмакова, М.В. Ульченко. Развитие северного морского пути и инфраструктуры арктической транспортной системы. — Региональные проблемы преобразования экономики №12, 2019— С89-94.
6. С.В. Кривошапова, В.В. Примак. Проблемы развития портового хозяйства Приморского края. — Вестник науки и образования, №1 (55) 2019 — С63-68.
7. Конференция Организации Объединенных Наций по торговле и развитию./ Адаптация морских портов к изменению климата в поддержку Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года// Женева 20–22 апреля 2020 года. — TD/B/C.I/MEM.7/23.
8. Энергетической обеспечение водного транспорта/Studme.org/URL https://studme.org/273795/tehnika/energeticheskoe_obespechenie_vodnogo_transporta/Lfnf. Дата обращения 16 09 2023.
9. О. М. Толокнова, В. А. Шошмин Метод анализа электропотребления перегрузочных процессов в порту. — Вестник государственного университета речного и морского флота имени адмирала С.О. Макарова, Выпуск 2 (36), 2016— С153-163.
10. Анализ направлений повышения эффективности

электроснабжения гупгс "севастопольский морской порт" / Кувшинов В.В., Гусева Е.В., Черкашина Н.И., Лепеха О.Г., Ивантеев И.С. // Естественные и технические науки. 2022. № 3 (166). С. 163-166.

11. 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.
12. Использование фотоэлектрических систем для электрообеспечения портовых сооружений / Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Ивантеев И.С., Абейдулин С.А. // Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5. № 4. С. 84-89.
13. 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

References

1. M.V. Polkanov. The importance of the electric power industry in the development of Russia. - Omsk Bulletin No. 3 (32), 2006— С38
2. Energy strategy of Russia for the period until 2035.
3. V.G. Korolev. Modern features and state of the electric power industry of the Russian Federation - "Innovations and Investments" No. 10, 2020 - С215-219.
4. Report on the functioning of the Unified Energy System of Russia in 2022. // System operator of the unified energy system.
5. E.P. Bashmakova, M.V. Ulchenko. Development of the Northern Sea Route and the infrastructure of the Arctic transport system. — Regional problems of economic transformation No. 12, 2019— S89-94.
6. S.V. Krivoschapova, V.V. Primak. Problems of development of the port economy of the Primorsky Territory. — Bulletin of Science and Education, No. 1 (55) 2019 — P63-68. // Natural and technical sciences. 2022. No. 3 (166). pp. 163-166.
7. United Nations Conference on Trade and Development/ Adapting seaports to climate change in support of the 2030 Agenda for Sustainable Development // Geneva April 20-22, 2020. - TD/B/C.I/MEM.7/23.
8. Energy supply for water transport/Studme.org/URL https://studme.org/273795/tehnika/energeticheskoe_obespechenie_vodnogo_transporta/Lfnf. Retrieved 09/16/2023.
9. O. M. Toloknova, V. A. Shoshmin Method for analyzing power consumption of transshipment processes in the port. — Bulletin of the State University of River and Sea Fleet named after Admiral S.O.

Makarova, Issue 2 (36), 2016— P153-163.

10. Analysis of directions for increasing the efficiency of power supply of the Sevastopol seaport state gas station / Kuvshinov V.V., Guseva E.V., Cherkashina N.I., Lepekha O.G., Ivanteev I.S. // .
11. Technologies for increasing the efficiency of combined power plants based on renewable types of energy / Kuvshinov V.V., Vlasov N.A., Kolomiychenko V.P., Ivanteev I.S., Medzhitov M.R. // In the collection: Advanced technologies and materials. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Sevastopol, 2022. pp. 370-374.
12. The use of photovoltaic systems for power supply of port facilities / Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Ivanteev I.S., Abeydulin S.A. // Energy installations and technologies. 2019. T. 5. No. 4. P. 84-89.
13. Possibilities for increasing the efficiency of power generation of photovoltaic modules / 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

УДК 620.92

Инновационные методы генерирования и преобразования энергии

Е.Г. Какушина¹

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

Статья поступила 18.09.2023 г.; после доработки 19.09.2023 г.

Аннотация

В статье рассматриваются инновационные методы генерирования и преобразования энергии, такие как солнечная энергетика, ветрогенераторы, гидроэнергетика, геотермальная энергетика и другие. Авторы анализируют преимущества и недостатки каждого метода, а также их влияние на окружающую среду и экономику. В статье также рассматриваются новые технологии, которые могут улучшить эффективность и снизить затраты на производство энергии.

Ключевые слова: Инновации, Генерация энергии, Преобразование энергии, Технологии, Экология, Энергосбережение, Энергетика, Альтернативная энергетика, Термоядерный синтез.

Innovative methods of generating and converting energy

E.G. Kakushina¹

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.

¹little@mail.ru

Received 18.09.2023 y.; received in final form 19.09.2023 y.

Abstract

The article discusses innovative methods of generating and converting energy, such as solar energy, wind generators, hydropower, geothermal energy and others. The authors analyze the advantages and disadvantages of each method, as well as their impact on the environment and economy. The article also discusses new technologies that can improve efficiency and reduce energy production costs.

For citation: Innovation, Energy generation, Energy conversion, Technology, Ecology, Energy conservation, Energy, Alternative energy, Fusion.

Введение

Современный мир невозможно представить без использования энергии, которая является необходимым ресурсом для функционирования промышленности, транспорта, бытовых устройств и многих других сфер жизни. Однако, в условиях растущего потребления и ограниченности ресурсов, энергетический вопрос становится одним из важнейших вызовов для человечества. В данной ситуации, развитие инновационных методов генерирования и преобразования энергии является необходимой мерой для обеспечения энергетической безопасности, сокраще-

ния выбросов углекислого газа и повышения эффективности использования энергии.

В настоящее время человечество сталкивается с глобальными проблемами, связанными с энергетическим кризисом и загрязнением окружающей среды. Разработка и внедрение инновационных методов генерирования и преобразования энергии является одним из ключевых направлений в борьбе с этими вызовами. В данной статье мы рассмотрим наиболее перспективные инновационные методы, которые могут быть использованы для производства и преобразования электрической и тепловой энергии. Мы

также рассмотрим их преимущества и недостатки, а также возможные области применения.

Краткий обзор инновационных методов генерирования и преобразования энергии.

Инновационные методы генерации и преобразования энергии - это тема, которая становится все более актуальной в современном мире, где энергопотребление продолжает расти, а запасы природных ресурсов ограничены.

Одним из таких методов является солнечная энергия. Солнечные панели, установленные на крышах домов или на земле, могут генерировать электроэнергию, используя солнечный свет. Это экологически чистый и возобновляемый источник энергии, который не требует топлива и не загрязняет окружающую среду. Солнечные батареи также могут быть использованы для питания электромобилей и других транспортных средств [3].

Еще одним инновационным методом генерации электроэнергии является гидроэнергетика. Гидроэлектростанции используют энергию падающей воды для производства электроэнергии [4]. Это возобновляемый и экологически чистый способ генерации энергии, который может использоваться для питания городов и промышленных объектов.

Однако, для того чтобы полностью перейти на возобновляемые источники энергии, необходимо разработать новые технологии, которые позволят производить электроэнергию более эффективно и экономично. Одним из таких технологий является термоядерный синтез [3]. Термоядерный реактор использует ядерный синтез для производства энергии, что может стать альтернативой традиционным источникам энергии.

Кроме того, существуют и другие инновационные методы генерации энергии, такие как энергия ветра, геотермальная энергия и биомасса. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, но все они могут быть использованы в будущем для создания более эффективных и безопасных энергетических систем [3].

Способы продвижения перспективных источников энергии

Существует несколько способов продвижения перспективных источников энергии:

- Государственная поддержка и стимулирова-

ние инвестиций. Государство может предоставлять льготы и субсидии для компаний, занимающихся разработкой и внедрением перспективных источников энергии. Также, правительство может создавать условия для привлечения инвестиций в данную область, например, путем снижения налоговых ставок для компаний, работающих в энергетическом секторе.

- Создание рекламных кампаний в социальных сетях.
- Образование и информирование общества. Чтобы перспективные источники энергии стали широко распространенными, необходимо информировать общество о преимуществах их использования. Важно проводить образовательную работу среди населения, чтобы люди понимали, как работают перспективные источники энергии и какие у них преимущества в сравнении с традиционными источниками. Также, необходимо донести до людей информацию о том, как они могут лично внести свой вклад в развитие энергетической эффективности и использования перспективных источников энергии.
- Организация мероприятий для привлечения внимания к перспективным источникам энергии.
- Инновации и технологический прогресс. Развитие новых технологий и инноваций в области энергетики может существенно ускорить процесс внедрения перспективных источников энергии. Компании, занимающиеся разработкой таких технологий, могут получать финансирование от государства и частных инвесторов, что стимулирует их дальнейшее развитие.
- Создание видеороликов и телевизионных передач о перспективных источниках энергии.
- Международное сотрудничество. Продвижение перспективных источников энергии также может происходить через международное сотрудничество. Государства могут объединять свои усилия в рамках международных организаций и программ, направленных на развитие энергетических технологий и переход к более эффективному и экологически чистому использованию энергии. Также, можно создавать международные партнерства и сотрудничать с другими странами для обмена опытом и передачи

технологий в области энергетики.

- Привлечение частных инвесторов. Компании, занимающиеся разработкой и внедрением перспективных источников энергии, могут привлекать инвестиции от частных инвесторов [4]. Для этого необходимо создавать условия для привлечения инвесторов, такие как прозрачность и надежность правовой и экономической среды, высокий потенциал прибыли и перспективы роста данного сектора. Важно также развивать средства массовой информации, чтобы они активно освещали достижения и перспективы в области использования перспективных источников энергии, что также может привлечь внимание и инвестиции со стороны частных инвесторов.
- Проведение опросов и исследований среди потребителей, чтобы определить их потребности и предпочтения в области перспективных источников энергии.
- Сотрудничество с экспертами в области энергетики и науки для создания новых перспективных источников энергии и разработки технологий для их использования.
- Участие в выставках и конференциях, где можно представить перспективные источники энергии и рассказать о них широкой аудитории.
- Создание специальных программ для образовательных учреждений, которые помогут студентам и учителям понять преимущества перспективных источников энергии и их применение в повседневной жизни.

Перспективные альтернативы традиционным источникам энергии

Существует множество перспективных альтернатив традиционным источникам энергии, которые могут стать основой будущей энергетической системы. Некоторые из них:

- Солнечная энергия. Использование солнечных панелей для генерации электричества является одним из самых перспективных источников энергии. Солнечная энергия бесплатна и неисчерпаема, и ее использование может значительно снизить зависимость от нефти и газа [1].
- Ветровая энергия. Ветровые турбины используются для генерации электричества из энергии ветра [5]. Это чистый источник

энергии, не производящий выбросов углекислого газа [1].

- Геотермальная энергия. Геотермальная энергия использует тепло, выделяемое из земли, для производства электричества. Этот источник энергии может быть использован в регионах, где есть гейзеры, гидротермальные источники и другие подобные явления [1].
- Гидроэнергетика. Гидроэнергетика использует энергию потока воды для генерации электричества. Это чистый источник энергии, но требует особой инфраструктуры, что ограничивает его использование в некоторых регионах [2].
- Биомасса. Биомасса используется для производства электричества из растительных и животных отходов. Этот источник энергии является экологически чистым, так как при горении биомассы выделяется только углекислый газ, который был поглощен растениями в процессе их роста [1].
- Гидрогенерация. Гидрогенерация использует энергию потока воды для генерации электричества. Это один из самых старых методов производства электроэнергии, но по-прежнему является перспективным источником энергии [1].
- Ядерная энергия. Ядерная энергия генерируется в результате деления ядер атомов тяжелых элементов, что происходит в ядерных реакторах. Этот источник энергии имеет высокую эффективность и относительно низкие выбросы углекислого газа, но также имеет риск ядерных аварий и проблему утилизации радиоактивных отходов [1].
- Энергия приливов и отливов. Энергия приливов и отливов используется для генерации электричества с помощью приливных и отливных движений. Это чистый источник энергии, но требует специальной инфраструктуры и может оказывать воздействие на экосистему морского берега [2].

Эти и другие перспективные источники энергии имеют свои преимущества и недостатки, и выбор того или иного источника энергии зависит от многих факторов, таких как потребности общества, экономические возможности, экологические факторы и технические ограничения. В целом, перспективные источники энергии представляют собой перспективный путь к решению

энергетических проблем и устойчивому развитию человечества.

Заключение

В заключение можно сказать, что инновационные методы генерирования и преобразования энергии являются важным направлением развития энергетики. Они позволяют использовать возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая и гидроэнергетика, а также создавать новые технологии для более эффективного использования традиционных источников энергии, таких как уголь, нефть и газ.

В целом, инновации в области генерирования и преобразования энергии открывают новые возможности для устойчивого развития энергетики и улучшения качества жизни людей во всем мире [3].

Перспективные источники энергии, такие как солнечная, ветровая, геотермальная, гидроэнергетика, биомасса, ядерная энергия и энергия приливов и отливов, становятся все более доступными и эффективными благодаря инновационным технологиям и методам.

Однако, преодоление вызовов в области энергетики требует всестороннего подхода и совместных усилий со стороны государств, компаний, научных и общественных организаций, а также каждого из нас в частности. Необходимо продолжать развивать новые технологии и инновации, стимулировать инвестиции и государственную поддержку, информировать общество о преимуществах перспективных источников энергии и обеспечивать доступность их использования. Только таким образом мы сможем обеспечить энергетическую безопасность, сократить негативное воздействие на окружающую среду и обеспечить устойчивое развитие человечества.

В целом, инновации в области генерирования и преобразования энергии открывают новые возможности для устойчивого развития энергетики и улучшения качества жизни людей во всем мире.

Список литературы

1. Воропай Н.Н., Кейко А.В., Санеев Б.Г. и др. Централизованная и распределенная, в том числе возобновляемая, энергетика: перспективные направления и тенденции // «Проблемы развития Российской энергетики»: материалы научной сессии Президиума Сибирского отделения РАН. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. - С. 37-55.
2. Санеев Б.Г., Латерев А.В., Ханаева В.Н., Чеме-

зов А.В. Перспективы развития энергетики России в XXI веке и выбросы парниковых газов // ТЭК. - 2004. - № 4. - С. 132-134.

3. Окорочков В.Р., Волкова И.О., Окорочков Р.В. Интеллектуальные энергетические системы: технические возможности и эффективность. Ч. 1. Технологические и социально-экономические основания их создания // Академия энергетики. - 2010. - № 2. - С. 72-80
4. Исследования и разработки СО РАН в области энергоэффективных технологий / под ред. С.В. Алексеенко. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. - 404 с
5. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга: пер. с англ. - М.: Мир, 1986. 6. Куашнинг Фолькер. Системы возобновляемых источников энергии / Пер. с нем., - Астана, 2013. - 432 с.

References

1. Voropai N.N., Keiko A.V., Saneev B.G., etc. Centralized and distributed, including renewable, energy: promising trends and trends // "Problems of Russian energy development": materials of the scientific session of the Presidium of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. - Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS, 2005. - pp. 37-55.
2. Saneev B.G., Laterev A.V., Khanaeva V.N., Chemezov A.V. Prospects for the development of Russian energy in the XXI century and greenhouse gas emissions // TEK. - 2004. - No. 4. - pp. 132-134.
3. Okorokov V.R., Volkova I.O., Okorokov R.V. Intellectual energy systems: technical capabilities and efficiency. Part 1. Technological and socio-economic foundations of their creation // Academy of Energy. - 2010. - No. 2. - pp. 72-80
4. Research and development of SB RAS in the field of energy-efficient technologies / edited by S.V. Alekseenko. - Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2009. - 404 p
5. Reader G., Hooper Ch. Stirling engines: trans. from English - M.: Mir, 1986. 6. Kuashning Volker. Systems of renewable energy sources / Translated from German, - Astana, 2013. - 432 p.

УДК 620.92

Применение геотермальной энергетики для коммунальных потребителей Севастополя

Р.А. Нашев¹, В.В. Кувшинов¹, Н.В. Бахтина,
В.П. Коломийченко², Н.А. Власов¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, bo_zemlya_zdoroviya@mail.ru,
VVKuvshinov@sevsu.ru

² Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище им. П.С. Нахимова (Севастополь)

Статья поступила 29.08.2023 г.; после доработки 30.08.2023 г.

Аннотация

Геотермальные ресурсы на территории Крыма и Севастополя позволяют обеспечивать потребителей тепловой энергией, не меняя существующие коммунальные системы, при этом значительно сокращая использование органического топлива. Геотермальная энергетика, используемая для коммунальных потребителей, представляет интерес как с точки зрения энергетики, так и экологии. Возможность использования геотермальной энергии позволяет в курортных городах увеличить качество работы тепловых котельных.

Ключевые слова: геотермальная энергетика, система теплоснабжения, геотермальная тепловая котельная, теплонасосная установка, коммунальные потребители.

Application of geothermal energy for municipal consumers of Sevastopol

R.A. Nashev, V.V. Kuvshinov, N.V. Bakhtina, V.P. Kolomiychenko, N.A. Vlasov
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia, bo_zemlya_zdoroviya@mail.ru,
VVKuvshinov@sevsu.ru

Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P.S. Nakhimov (Sevastopol)

Received 29.08.2023 y.; received in final form 30.08.2023 y.

Abstract

Geothermal resources in the Crimea and Sevastopol make it possible to provide consumers with thermal energy without changing existing utility systems, while significantly reducing the use of fossil fuels. Geothermal energy used for municipal consumers is of interest from both an energy and environmental point of view. The possibility of using geothermal energy allows in resort cities to increase the quality of operation of thermal boiler houses.

Key words: geothermal energy, heat supply system, geothermal thermal boiler house, heat pump installation, utility consumers.

Введение

Для энергоснабжения крупного курортного города, которым является Севастополь, используется огромное количество тепловых котельных, значительная часть которых работает на твердом топливе – угле, а также на жидком топ-

ливе или природном газе. Традиционные органические топлива плотно вошли в бытовую сущность коммунального потребителя. Однако несмотря на высокую стоимость тепловой энергии население не заботится о снижении потребления, при этом вредные выбросы от сгорания углеводородов в курортном городе также не приносят

здоровья окружающим. Использование экологически чистых, возобновляемых источников энергии (таких как термальная энергия, солнечный нагрев и др.) в данный момент не является актуальной задачей. Работа котельных в неотапливаемый сезон сводится к нагреву и подачи горячей воды населению. Однако геотермальные установки вполне способны частично заменить традиционные установки и при нагреве теплоносителя использовать тепловую энергию Земли [1]. Главным достоинством геотермальной энергии является ее практическая неиссякаемость и полная независимость от условий окружающей среды, времени суток и года. Наиболее успешно реализованные проекты имеют скважины, пробуренные непосредственно в естественные подземные коллекторы геотермальных районов. Использование энергии земных недр в установках позволяет повысить температуру теплоносителя в случае теплового преобразования энергии [2]. Применение горячих термальных источников с температурами, необходимыми для парообразования, в геотермальных электростанциях позволяет использовать тепло Земли для выработки электроэнергии [1-4].

Постановка задачи

Главной проблемой применения тепловых термальных установок является невысокая температура теплоносителя и необходимость использовать мощные насосы для откачки теплоносителя из скважин, с дальнейшим преобразованием в тепловую энергию для подачи потребителям [5]. Непостоянство работы насосного оборудования приводит к низкой эффективности использования, и, как следствие, высокой себестоимости за единицу мощности. В последние годы наметилась тенденция повышения стоимости геотермальных установок за единицу мощности [6-8]. Невысокий термический потенциал скважин определяет более высокие требования к насосному и теплообменному оборудованию, используемому для водообеспечения и теплоснабжения потребителей [6-8], к методам определения их основных характеристик [8].

Повышение эффективности работы геотермальных установок и насосного оборудования, используемого для обеспечения потребителей, в настоящий момент может способствовать более быстрому внедрению возобновляемой энергии в повседневный быт населения, что несомненно отразится на качестве воздуха и уменьшит транспортные расходы, связанные с перевозкой и доставкой органических топлив на полуостров.

Для выполнения поставленной цели были проведены следующие основные исследования:

- анализ геологических пород в г. Севастополе, с целью поиска возможных путей установки геотермального оборудования (ГТУ);
- анализ существующих тепловых мощностей Севастополя, с целью выявления возможных путей повышения их характеристик при использовании ГТУ, снижения себестоимости на единицу вырабатываемой мощности;
- анализ тепловых котельных для работы промышленных геотермальных установок, поиск и разработка систем пригодных для практического применения, экспериментальное исследование работы основного и вспомогательного оборудования при работе в составе котельных с ГТС.

Характеристика подземных вод Севастополя следующие: глубина залегания – 600-1200 м, температура воды – 48-85 °С, состав воды – слабоминерализованная, пригодная для питья. Потоки подземных вод проходят под территориями практически всех районов города Севастополя (рис. 1).

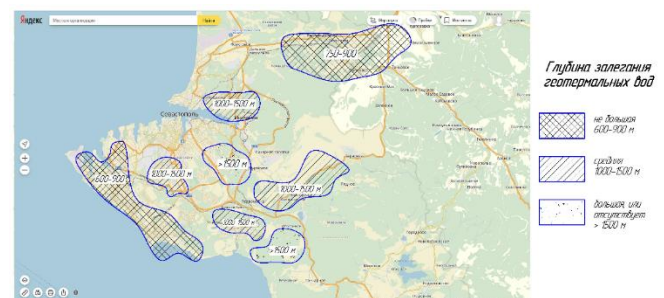


Рис. 1. Геотермальные ресурсы на территории Севастополя

Используя карты геотермальных вод Севастополя, можно определить в каких районах города возможно использование теплоты земного грунта для целей энергоснабжения. Для работы комбинированных тепловых геотермальных котельных систем необходимо использовать данные коммунальных служб Севастополя по обеспечению жилых домов и других потребителей города [5-7].

Результаты исследования

В результате проведенной работы была исследована практическая возможность обеспечения индивидуальных потребителей тепловой геотермальной энергией путем использования

термальных вод. В ходе работы была исследована практическая возможность использования промышленных тепловых геотермальных установок с повышенной эффективностью при оснащении ими тепловых объектов. На основе экспериментальных данных исследована возможность использовать в качестве оборудования глубокие погружные насосы в геотермальных станциях.

Для обеспечения потребителей города был выбран участок, расположенный в Камышовой бухте. В качестве исходных данных для реализации проекта были выбраны расчетные характеристики местной котельной (рис. 2).

Одной из целей данной работы была разработка проекта теплообеспечения жилого массива использующий в качестве источника энергии тепло подземных вод с температурой 85 градусов.



Рис. 2. Местность для установки геотермальной системы

Для выполнения данной работы был разработан проект котельной, который возможно использовать в коммунальном хозяйстве города (рис. 3).

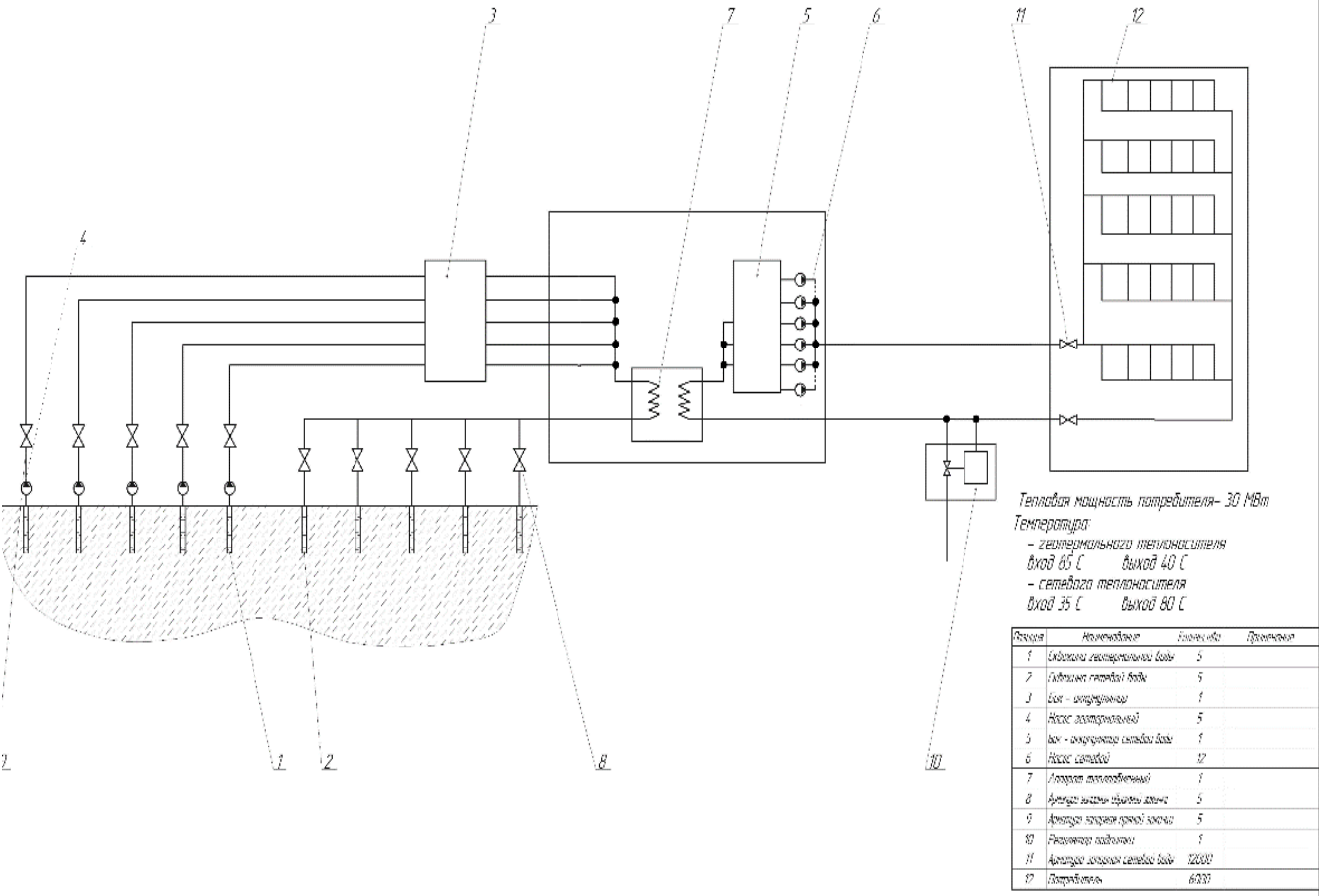


Рис. 3. Проект геотермальной котельной

Для реализации проекта было предложено основное и вспомогательное оборудование. Ос-

новным элементом данной системы является теплообменный аппарат, конструкция которого приведена на рис. 4.

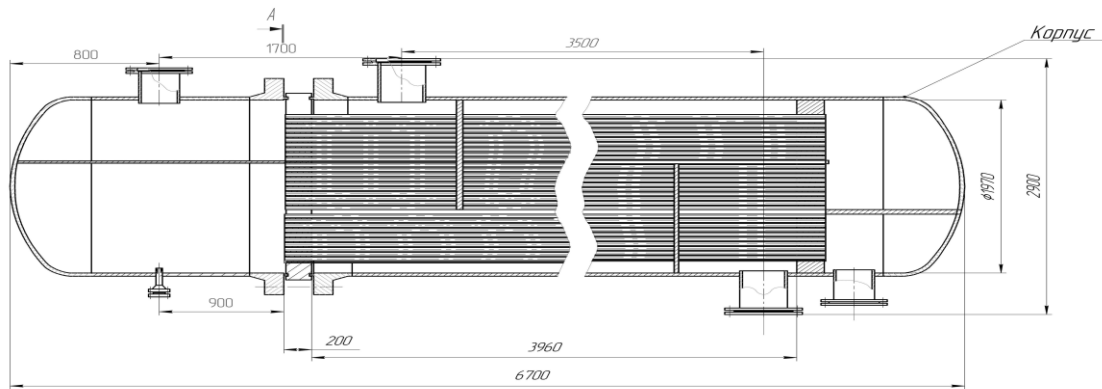


Рис. 4. Водно-водяной теплообменник (габаритные размеры)

Теплообменные аппараты составляют при геотермальных станциях являются базовыми элементами, определяющими их эффективность. Для определения основных параметров теплообменника используемого в предложенной установке был проведен его тепловой расчет [4].

В качестве определяющей температуры воды на входе в теплообменник принимают среднюю температуру горячей жидкости.

$$T_1 = T_{ж1} = 0,5 \cdot (T_1' + T'') = 0,5 \cdot (85 + 40) = 63 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_2 = T_{ж2} = 0,5 \cdot (T_2 + T'') = 0,5 \cdot (80 + 35) = 58 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (1)$$

Определение температуры стенки теплообменника [6-11] находится по эмпирической формуле:

$$T_{с.} = T_2 + X \cdot (T_1 - T_2) = 58 + 0,5 \cdot (63 - 58) = 61 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (2)$$

При одинаковых коэффициентах теплоотдачи $a_1 > a_2$ в водо-водяных теплообменниках - коэффициент $X = 0,5$.

По определяющей температуре $T_1 = 630 \text{ K}$ находим другие физические величины: плотность воды $\rho = 981,55 \text{ кг/м}^3$, средняя изобарная теплоемкость $C_{p2} = 4,184 \text{ кДж/кг} \cdot \text{K}$, коэффициент теплопроводности $\lambda_2 = 0,6522 \text{ Вт/м} \cdot \text{K}$, кинематический коэффициент вязкости $\nu_2 = 0,4902 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, число Прандтля $Pr_{ж2} = 3,102$, коэффициент объемного расширения $\beta_2 = 4,986 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Также можно определить водяные эквиваленты теплоносителей:

$$C_1 = \frac{Q}{T_1' - T_1''} = \frac{30 \cdot 10^6}{85 - 40} = 652174 \frac{\text{Вт}}{\text{K}};$$

$$C_2 = \frac{Q}{T_2' - T_2''} = \frac{30 \cdot 10^6}{80 - 35} = 652174 \frac{\text{Вт}}{\text{K}}. \quad (3)$$

И вычислить значение числа Рейнольдса для воды первого контура:

$$Re_{1,жд} = \frac{W_1 \cdot d_H}{\nu_1} = \frac{0,16 \cdot 0,023}{0,4565 \cdot 10^{-6}} = 8061 \quad (4)$$

По числу Рейнольдса и расположению труб в пучке можно выбрать уравнение подобия для процесса теплоотдачи при поперечном обтекании пучка труб и входящие в него величины [6]. Теплообменник устанавливается в местной системе горячего водоснабжения.

Опыт использования геотермальных источников показал большие возможности во внедрении систем теплоснабжения с использованием источников геотермальной энергии. Температурный режим и химические характеристики геотермальных вод Севастополя позволяют их практическое использование в системах теплоснабжения жилищно-коммунального сектора.

Для повышения тепловой нагрузки и увеличения эффективности использования альтернативного природного источника тепла (геотермальных вод) была предложена схема теплообеспечения жилых домов в районе г. Севастополя на базе существующих котельных, с использованием теплонаносных станций [6-8]. Одна из схем системы теплоснабжения с использованием геотермальных вод, показана на рис. 5 [7].

Использование тепловых насосов (ТН) значительно повышает энергетический эффект всей системы. Подобные разработки дают возможность рассчитывать на значительный экономический эффект от внедрения энергосберегающих технологий, основанных на использовании термальных вод.

При использовании органических топлив происходит нарушение экологических характеристик, особенно это заметно в крупных городах, которым является Севастополь. Использование геотермальной энергии позволяет круглогодично потреблять возобновляемую энергию для обеспечения коммунальных потребителей в

городских условиях, при этом с учетом курортного значения региона значительно увеличивается экологическая составляющая.

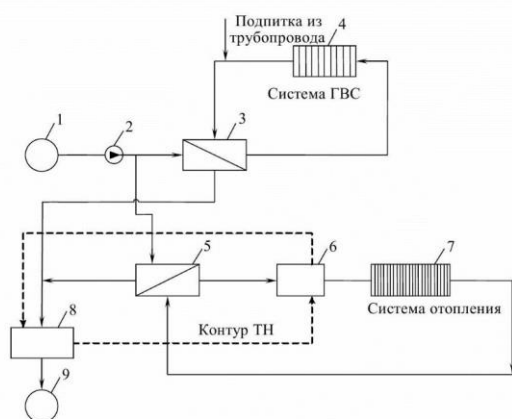


Рис. 5. Система теплоснабжения с использованием геотермальных вод:

1 – геотермальный источник; 2 – насос подачи геотермальной воды; 3 – бойлер ГВС; 4 – система горячего водоснабжения (ГВС); 5 – бойлер отопления; 6 – конденсатор теплового насоса (ТН); 7 – система отопления; 8 – испаритель теплового насоса; 9 – скважина утилизатор.

Выводы

Предложенные геотермальные системы позволяют использовать в составе существующих систем коммунального теплоснабжения города. При этом значительно сокращается использование органического топлива. Расчеты, выполненные по объемам сэкономленного природного газа, показывают, что использование геотермальной энергии существенно сократит финансовые затраты на услуги теплоснабжения для коммунального потребителя.

Предварительные исследования скоплений геотермальных вод в Севастопольском регионе показывают, что их геофизические параметры залегания позволяют практическое их использование для обеспечения коммунального хозяйства практически по всей территории района.

Работы по исследованию возможностей теплового обеспечения объектов коммунального сектора, позволяют разрабатывать и внедрять проекты использования геотермальных вод для теплоснабжения объектов, расположенных в других районах Республике Крым.

Список литературы

1. С.Н. Талецкий и др. Региональная оценка перспектив территории работ ПГО «Крымгеология»

- на термальные воды, Симферополь, 1991 г.
2. Левин Б.И. Теплообменные аппараты систем теплоснабжения, М. – Л.: Энергия, 1965. – 256 с.
3. Тарасов Ф.М. Теория и расчет поточных теплообменников. – Л.: Энергия, 1975. – 238 с.
4. Левин Р.Е. Теплотехника: котельные установки, тепловые двигатели, М.: Metallurgizdat, 1951. – 286 с.
5. Использование тепловой геотермальной энергии для обеспечения коммунальных потребителей в г. Севастополь / Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Тиман Д.И., Жиганов И.В., Стаценко А.К. // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7. № 2. С. 92-96.
6. Потенциал развития тепловой солнечной энергетики для нужд коммунального хозяйства / Бордин Д.Ф., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Олейников А.М., Гхашим М. // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7. № 1. С. 46-52.
7. Резаков А.Т. Геотермальный тепловой пункт системы теплоснабжения п. Янтарное в Крыму / А.Т. Резаков, А.В. Щурчков // Промышленная теплотехника. - 2000. - т. 22. - № 5-6. - С. 99-103.
8. ВСН 56-87 Геотермальное теплохладоснабжение жилых и общественных зданий и сооружений. Нормы проектирования. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901707728>.

References

1. S.N. Taletsky et al. Regional assessment of the prospects for the work area of the PGO "Crimgeology" for thermal waters, Simferopol, 1991.
2. Levin B.I. Heat exchangers of heat supply systems, M. - L.: Energia, 1965. - 256 p.
3. Tarasov F.M. Theory and calculation of in-line heat exchangers. – L.: Energy, 1975. – 238 p.
4. Levin R.E. Heat engineering: boiler plants, heat engines, M.: Metallurgizdat, 1951. – 286 p.
5. Use of thermal geothermal energy to supply municipal consumers in the city of Sevastopol / Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Timan D.I., Zhiganov I.V., Statsenko A.K. // Energy installations and technologies. 2021. T. 7. No. 2. P. 92-96.
6. Potential for the development of thermal solar energy for the needs of municipal services / Bordin D.F., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Oleinikov A.M., Ghashim M. // Energy installations and technologies. 2021. T. 7. No. 1. P. 46-52.
7. Rezakov A.T. Geothermal thermal point of the heat supply system of the village of Yantarnoye in Crimea / A.T. Rezakov, A.V. Shchurchkov // Industrial heat engineering. - 2000. - t. 22. - No. 5-6. - P. 99-103.
8. VSN 56-87 Geothermal heat and cold supply of residential and public buildings and structures. Design standards. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/901707728>.

УДК 531.717.2

Технология контроля основных узлов ВЭУ на этапах производства

М.О. Синица¹, А.С. Комшин²¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Россия, sinitsa@bmstu.ru²МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Россия, komshin@bmstu.ru

Статья поступила 30.08.2023 г.; после доработки 01.09.2023 г.

Аннотация

В статье описан новый усовершенствованный подход (технология) к проведению измерений (контроля) основных узлов ВЭУ с применением средств измерений на базе лазерных/оптических технологий. Внедрение подобных технологий ведет к снижению доли обнаруженного брака узлов продукции и, соответственно, снижению экономических затрат. Приведены характеристики разработанных стендов, их экономическая целесообразность и эффективность.

Ключевые слова: ветроэнергетика, измерения, контроль, ВИЭ, бесконтактный метод, лазерные технологии, оптические технологии, контрольно-измерительный стенд.

The technology of control of the main wind turbine units at the production stages

M.O. Sinitsa¹, A.S. Komshin²¹BMSTU, Moscow, 105005, Russia, Sinitsa@bmstu.ru²BMSTU, Moscow, 105005, Russia, komshin@bmstu.ru

Received 30.08.2023 y.; received in final form 01.09.2023 y.

Abstract

The article describes a new improved approach (technology) to the measurement (control) of the main wind turbine units using measuring instruments based on laser/optical technologies. The introduction of such technologies leads to a decrease in the proportion of detected defects of product components and, accordingly, a reduction in economic costs. The characteristics of the developed stands, their economic feasibility and efficiency are given.

Keywords: wind energy, measurements, control, RES, contactless method, laser technologies, optical technologies, control and measuring stand.

Введение

На сегодняшний день рост мирового потребления энергии замедлился, но остался выше среднего темпа роста в период с 2010 по 2019 год. По данным международной независимой информационно-консалтинговой компании Enerdata¹ большая доля процентного потребления энергии приходится на ископаемое топливо, см. рисунок 1, (38% нефти, 34% природного

газа, 28% угля), в целом за последние 3 года потребление и использование возобновляемых источников энергии выросло и на период 2022 г., в мировом энергетическом балансе была достигнута отметки 30 %.

Доля потребления солнечной и ветровой энергии постоянно растет, только в 2022 году прирост составил более чем 12% (+75 ГВт новой ветровой мощности и +191 ГВт новой солнечной

¹ <https://energystats.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>

мощности). К 2050 году по предсказанию аналитиков, ветро- и солнечная энергетика обеспечат почти 70% мировой электроэнергетики.

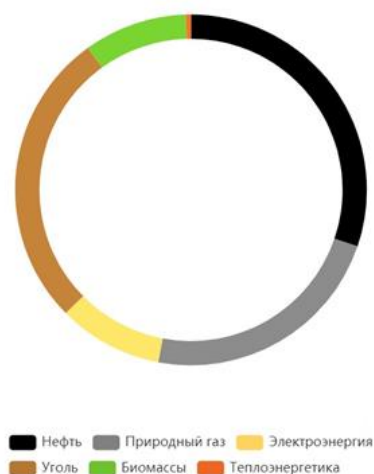


Рис. 1. Разбивка по типу энергии (2022) – Мтое

Согласно отчету британского аналитического центра Ember² в 2022 году ветер был источником электроэнергии с наибольшим абсолютным приростом. Из отчета Ember 2023 года [1] глобальная выработка электроэнергии ветром увеличилась на 17% (+312 ГВт) по сравнению с 2022 годом (+2160 ГВт). Энергия ветра возросла по всему миру, например, США (+56 ГВт, +15%) и ЕС (+34 ГВт, +8,8%) зафиксировано значительное увеличение выработки энергии ветром, в Великобритании (+15 ГВт, +23%), Бразилии (+8,5 ГВт, +12%) и Вьетнам (+6,3 ГВт, +262%). Наибольший рост ветроэнергетики произошел в Китае и составил более половины общемирового прироста (+168 Т ГВт, +26%). Британские аналитики из центра Ember предполагают, что для перехода энергетического сектора на 1,5C выработка энергией ветра должна увеличиться до 7840 ГВт, для этого необходим ежегодный прирост в 17%. К 2022 году ветроэнергетика достигла таких темпов роста, но с 2015 – 2022 среднегодовой прирост составил 15%.

Сегодня активно пользуются популярностью офшорные ветроустановки. Среднегодовой темп роста таких установок в прогнозируемый период 2022-2027 составит более 10,78% [2]. Например, в апреле 2023 года шведская компания Freja Offshore подала заявку на строительство крупнейшей ветряной электростанции «Mareld»³ с установленной мощностью 2500

МВт [3]. По данным с сайта проекта «Mareld» первое электричество потребители получат к 2028 году. Freja Offshore планирует развивать офшорную ветроэнергетику на четырех площадках в Швеции, что обеспечит электроэнергией более 6 миллионов хозяйств. Сегодня крупнейшей ветряной электростанцией считается Hornsea 2 в Великобритании, у которой установленная мощность равна 1300 МВт [4]. Очевидно, что мировая энергетика переживает активную стадию перехода на «зеленые» технологии, и за последние 10 лет суммарная установленная мощность электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии, выросла в 2,15 раза.

Ветроэнергетика в России

По данным информационного бюллетеня Ассоциации Развития Возобновляемой Энергетики (АРВЭ) состояние на июль 2023 года совокупная установленная мощность объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии, преодолела порог 6,0 ГВт. В структуре установленной мощности лидируют ветроэлектростанции и солнечные электростанции, на которые приходится 2,5 ГВт и 2,2 ГВт мощности.

Сегодня на оптовом рынке электроэнергии и мощности функционируют 25 ветроэлектростанций в восьми субъектах РФ совокупной мощностью 2 360,0 МВт, из которых наибольший объем реализованных проектов зафиксирован у компаний ПАО «Фортум» — 1 112,6 МВт и АО «НоваВинд» — 940,0 МВт; ПАО «ЭЛ5-энерго» владеет 292,4 МВт, ООО «ВЭС «Бриз» — 15,0 МВт [5].

Доля установленной мощности ВИЭ в энергосистеме Российской Федерации на апрель 2023 года составляет 2,3%. Прирост за последние полгода — 0,1 % [6]. Выработка в первом квартале 2023 года составила 2,4 млрд кВт*ч, при этом доля в общем объеме выработки по данным ЕЭС России составляет всего 0,75 %.

В I квартале 2023 года по данным ежеквартального отчета «январь-март 2023г.» АРВЭ объем установленной мощности на основе ВИЭ - генерации в ЕЭС России составил 35,25 МВт [7]. С 01.01.2023 по 01.04.2023 в эксплуатацию было введено три ветропарка:

Кольская ВЭС (Мурманская область) — мощностью 201 МВт, производитель «Эл5-

² <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/#supporting-material>

³ <https://mareld.org/>

Энеро»;

Кузьминская ВЭС (Ставропольский край) – мощностью 160 МВт, производитель «Новавинд»;

Берестовская ВЭС (Ставропольский край) – мощностью 60 МВт, производитель «Новавинд».

Из-за политической ситуации в России прошлой весной ряд иностранных компаний объявили об уходе с российского рынка и о приостановлении инвестиций в новые проекты, в связи с чем встал вопрос об импортозамещении. После объявления о прекращении сотрудничества между Россией и странами ЕС российское производство ВИЭ-оборудования стали испытывать серьезные проблемы. Инвесторы столкнулись со сложностями исполнения иностранными поставщиками подписанных ранее контрактов на поставку оборудования, с ограничениями на присутствие иностранных экспертов для проведения пусконаладочных работ. Все это стало причиной вывода задачи импортозамещения в российском топливно-энергетическом комплексе на первое место.

Сегодня в российской ветроэнергетике реализуются программы по импортозамещению, а именно программы по углублению локализации и расширению промышленной кооперации с отечественными поставщиками. На сегодняшний день уровень локализации производства составляет 68%, сюда входит сборка ступицы, генератор, система охлаждения, каркас гондолы, сборка гондолы, башня, трансформатор, проектно-изыскательские работы, монтаж, электро-монтаж. К 2027 году планируемый результат должен достигать 75% [7].

Так, например, с уходом крупного поставщика оборудования для ВЭС на сайте «Росатом» была размещена информация в марте этого года о создании предприятия производства лопастей. Завод предполагается разместить в Ульяновске, что позволит восстановить утраченные с уходом датской компании Vestas промышленные компетенции по производству композитных лопастей методом вакуумной инфузии.

Технология контроля основных узлов ВЭУ на этапах производства

Сегодня реализация производства в формате Индустрии 4.0 невозможно представить без внедрения современных автоматизированных технологий. Так в публикациях [8-10] авторами приводятся примеры реализаций «умного» про-

изводства. Уже сегодня контрольно-измерительная аппаратура представляет собой измерительные комплексы в сочетании с современными методами измерений и контроля, а также продвинутыми методиками выполнения измерений.

Нынешний процесс производства без внедрения такой аппаратуры представить очень сложно, особенно в части ВИЭ, где преобладают крупногабаритные детали. Использование контрольно-измерительных комплексов при изготовлении продукции особого назначения, крупногабаритных объектов или изделий нестандартной конфигурации позволяет проводить трудоемкие измерения за короткий промежуток времени с более высокой точностью, что дает возможность проконтролировать геометрические параметры изделий от точности изготовления, которых зависит их правильное функционирование и безопасность.

Исследования по теме внедрения бесконтактных измерительных технологий контроля геометрических параметров и крупногабаритных изделий в МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся уже не в первый год [11-13]. В статье «Development of a system for controlling the geometry of products in heavy and general engineering by non - contact methods» [14] были рассмотрены основные проблемы возникновения аварий на ветроустановках. Вывод, приведенный в статье, раскрывает проблему низкого уровня метрологического обеспечения на стадии изготовления. Таким образом, в приведенной ниже статье, рассмотрим подробнее технологии повышения уровня метрологического обеспечения основных узлов ветрогенератора: изготовление лопастей и составных колец ветротурбины

Технология и особенности изготовления основных узлов ВЭУ

Аварии, связанные с конструкцией ветротурбины, а именно возгорания турбины, поломки лопастей, разрушения основания ветряка, т.е. башни – таких большинство, за последние 13 лет насчитывается около 675 аварий (данные на 2020 год). На сегодняшний день в сети все больше и больше появляется информации о разрушении башен нового образца. На новостном сайте «news.rambler.ru» в статье от 23.01.2023 г. «...Крупнейшие производители ветрогенераторов Vestas, General Electrics и Siemens Gamesa подтвердили журналистам, что снижение надежности новых ветряков связано со стремлением как можно быстрее разрабатывать и выпускать

все более мощные турбины. Поскольку строители проектируют лопасти длиной с футбольное поле, чтобы улавливать больше энергии ветра, разработчики могут устанавливать меньше турбин для выработки того же количества энергии» [15]. С увеличением мощности ветротурбины прямо пропорционально уменьшается и надежность всей конструкции, что ведет к поломке всей башни. Именно поэтому в первой части статьи необходимо разобраться с конструктивными особенностями изготовления лопастей и составных колец Башен ВЭУ.

Особенно производства лопастей

Сложность при проектировании новой турбины более высокой мощности заключается в поиске «компромиссов» между аэродинамической и конструктивной эффективностью, выбор основного материала, процесс изготовления, склейки и сборки будет влиять не только на конструктивные особенности и свойства, производимые дальнейшим продуктом, но и на ценовую категорию. Из этого можно сделать вывод, что процесс проектирования конструкций играет решающую роль в объединении всех дисциплин проектирования и создании оптимального решения с точки зрения производительности и стоимости.

При изготовлении лопасти необходимо учитывать следующие критерии:

1. обеспечение достаточной прочностью. Лопасть должна быть прочной у основания для создания достаточной подъемной силы с учетом более низкой скорости ветра вблизи ступицы;
2. обеспечение достаточным сопротивлением. Лопасть должны быть достаточно заужена к концу всей детали. Зауженная часть лопасти необходима на вершине, где сопротивление наиболее критично, также для регулирования мощности при сильном ветре, тонкая часть более легко срывается, поэтому полезна на конце.

Таким образом, выводом к основным конструктивным особенностям лопасти является ее форма и толщина, которые напрямую влияют на эффективность и вырабатываемую мощность ветроустановки. Из критериев, приведенных выше, видно, что разная толщина изделия необходима для создания подъемной силы, которая, в свою очередь, приводит в движение турбину и у вершины имеет больше подъемной силы, чем у ступицы. Такие манипуляции нужны для достижения оптимальной геометрии. Подъемная сила

воздействует на лопасть, изгибая ее, что может привести к разрыву. Сегодня при производстве проводят испытания на различные свойства, такие как, например, испытания на надежность, прочность, качество, работы на отказ и энергоэффективность [16]. Для достоверных результатов необходимо внедрять инновационные технические решения, построенные на научной и современной технологической базе.

Актуальным направлением в контрольно-измерительных операциях, на сегодняшний день, в метрологии считается проведение измерений с использованием методов и средств на базе современных лазерных и оптических измерительных систем. Так как от качества изготавливаемой лопасти зависит большая часть вырабатываемой электроэнергии, то повышение таких параметров как надежность, точность изготовления формы, а именно соответствие заданным аэродинамическим показателям, во многом зависит от качества выполняемого контроля.

Технология контроля формы лопасти ВЭУ

С развитием технологий в области ВИЭ особое внимание уделяется развитию ветроэнергетики. С уходом Датской компании «Vestas» с российского рынка встает вопрос об импортозамещении и реверсе технологий важных узлов ветротурбин.

Разрабатываемые методики должны соответствовать современному высокому уровню производства, качеству и надежности изготавливаемой продукции, но также должны быть дешевыми в применении.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана активно ведутся работы в сфере ВИЭ. Так на Всероссийской научной конференции с международным участием и XII научной молодежной школы от МГУ им. М.В. Ломоносова в 2020 г. была представлена работа по повышению метрологического обеспечения лопастей ВЭУ больших размеров (от 60 м) на этапах производства [17]. В работе был представлен стенд, рисунок 2, для измерения и контроля формы лопасти ветротурбины при помощи лазерного сканирования.

Стенд представляет собой передвижную конструкцию, оснащенную электроприводом для автоматического передвижения средства контроля, пример конструкции изображен на рисунке 2.

Для контроля формы лопасти предполагается, что исследуемая лопасть закрепляется в бокс, который используется на этапах контроля

сопротивления, для того чтобы достичь минимального отклонения от соосности.

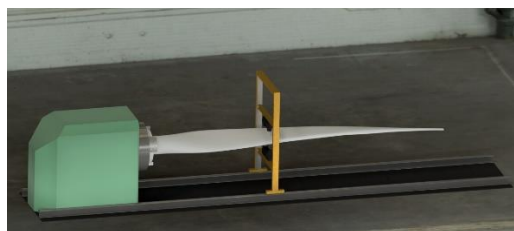


СХЕМА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3-D СКАНИРОВАНИЯ

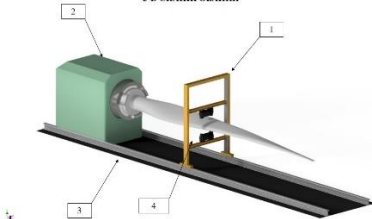


Рис. 2. 3-D модель испытательного стенда

- 1) передвижная рама с измерительным инструментом;
- 2) система базирования лопасти ВЭУ;
- 3) рейки, по которым происходит передвижение рамы;
- 4) расположение сканеров относительно поверхности объекта измерения

В данном комплексе используется технология 3- D сканирования. Через тонкий конец лопасти продевают раму с 3-D сканерами, так чтобы деталь оказалась между двумя сканерами. Это позволит провести сканирование сразу двух поверхностей. Сканеры установлены в защитные кожухи, для предотвращения возможного столкновения с поверхностью при измерении. Движение рамы осуществляется по рейкам. После окончания процедуры сканирования оператор получает 3- D модель формы лопасти для проведения дальнейших расчетов, анализа состояния объекта исследования. Передвижение устройства осуществляется по рейкам. Рейка служит для регулировки положения прибора, закреплённого на кронштейне.

Полученные результаты можно использовать на предприятии в режиме онлайн. Характеристики и преимущества разработанного стенда для контроля формы лопасти ВЭУ приведены в таблице 1.

При дальнейшей работе с данной тематикой был разработан другой подход к измерению формы лопасти. Если при первом варианте работы контроль лопасти предполагался на последнем этапе сканирование и «склейка» конечной фигуры проводилась при помощи специальных меток, то для нового подхода предлагается

использовать лопасть без обработки и покраски, то есть после процесса склейки между собой 2-х частей. Вместо оптического приспособления предполагается использование лазерных технологий (лазерный модуль с рассеиванием луча «сетка»).

Таблица 1. Преимущества разработанной технологии

Характеристики	Показатели
Точность контрольно-измерительных операций	0,1 мм
Погрешность измерения отклонения формы	± 250 мм
Геометрические характеристики объекта	Габаритные размеры св. 10 м
Стоимость	От 1000 000 руб.
Обнаружение брака	В процессе производства

Идея конструкции заключается в том, что на лопасть проецируется сетка таким образом, чтобы на изделие проецировалась сетка, как показано на рисунке 3.

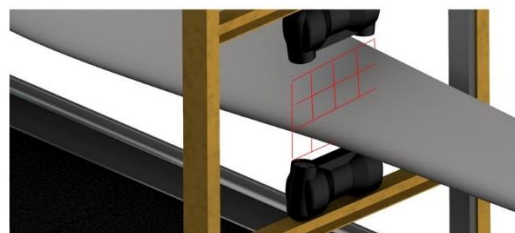


Рис. 3. Установка лопасти с применением лазерного модуля

После установки объекта, как показано на рисунке 3, фиксируются точки видеокамерой. Камера фиксирует изображение и передает его на ПК, где программа уже проводит анализ полученной картинке, пример зафиксированного изображения приведен на рисунке 4.

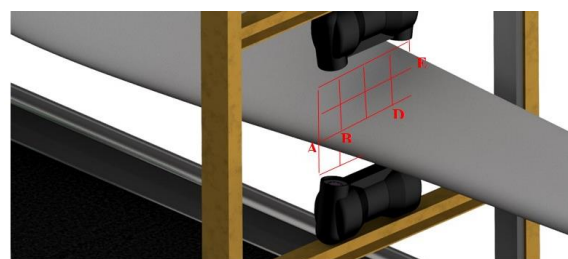


Рис. 4. Пример изображения зафиксированного изображения с проставленными контрольными точками

Сегодня, в рамках выполнения гранта программы «Умник», разработан и собран макет предполагаемого стенда, рисунок 5.

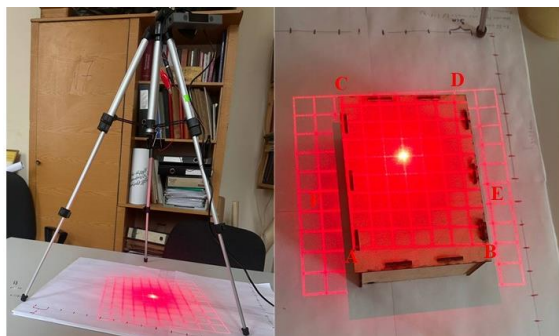


Рис. 5. Собранный макет для измерения формы

При использовании таких технологий важно учитывать особенности лазерного излучения, рассеивания луча, базирования системы и объекта исследования и т.п.

Технология контроля отклонения круглости составных колец ВЭУ

Вторым важным узлом в ветротурбине считается башня. От качества изготовления, от конструкции, от материала и от много другого зависит надежность и срок службы конструкции. Изготовление составных колец башен проходит в 10 этапов:

1. резка листового материала;
2. снятие фасок;
3. соединение листовых деталей
4. гибка роликами
5. сварка длинных швов/фланцев
6. сборка секций
7. сварка секций
8. транспортировка секций
9. дробеструйная обработка
10. покраска

Наиболее подверженный к появлению различных дефектов этап 4 и 5. При изготовлении башен для ветроустановок могут возникнуть дефект - отклонение от округлости. Возникновение такого дефекта в дальнейшем может привести к неправильному свариванию частей башен между собой, из-за чего в конечном итоге может произойти разрушение конструкции.

Расчет наиболее опасных участков составного кольца ветроустановки

Башни изготавливаются в виде толстостенных труб. Они устанавливаются на фундамент с использованием крепежных закладных элементов

с учетом требований СНиП. На рисунке 6 показано возможное расположение болтов через равный шаг по окружности на фланце трубы: вариант «а» - через 45° ; вариант «б» - через 30° . Показана также ось изгиба при заданном направлении ветра. Диаметр расположения болтов — $d_{\text{фл}}$.

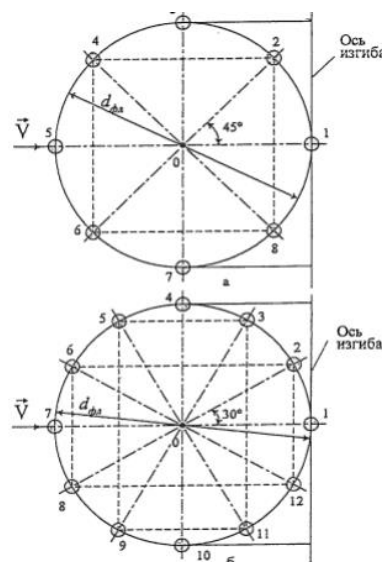


Рис. 6. Расположение болтов на фланце трубы несущей мачты

Для расчетов используется схема «б» с возможным расположением болтов через равный шаг по окружности на фланце трубы через 30° . Высота башни составляет 100 м, диаметр нижнего кольца равняется 17 м, тогда когда внутренний диаметр равен 16,3 м, так как толщина стенок башни составляет от 600 мм до 700 мм. Скорость ветра на высоте 10 м в Ульяновской области равна 3,8 м/с. Радиус ометаемой окружности ветрогенератора составляет 60 м.

Ветровые нагрузки непосредственно на башню ВЭУ по выражениям, полученным ЦАГИ экспериментально на моделях, следующие:

Для силы давления на башню

$$P_{\text{башн}} = R_x \left(\frac{H}{H_{\text{мод}}} \right)^2 V_{\text{бур}}^2 \quad (1)$$

где $H_{\text{мод}}$ — высота модели, м, приближенно равная 0,5 м; R_x — размерный коэффициент цилиндрической башни со сплошной поверхностью.

$$R_x = 0,00105 \cdot 9,8 = 0,0103 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2} \quad (2)$$

Изгибающий момент относительно основания башни, создаваемый силой давления непосредственно на башню,

$$M_{\text{изг}} = P_{\text{башн}} \cdot h_{\text{равн}} \quad (3)$$

где $P_{\text{башн}}$ — определена по формуле (1), а $h_{\text{равн}}$ — расстояние от основания башни до

точки приложения равнодействующей силы.

$$h_{\text{равн}} = 0,43H \quad (4)$$

Момент инерции кольцевого сечения относительно оси изгиба определяется по формуле 5:

$$J_{\text{отн.оси.изг.}} = \frac{\pi}{4} (R_{\text{тр}}^4 - r_{\text{тр}}^4) + R_{\text{тр}}^4 \pi (R_{\text{тр}}^2 - r_{\text{тр}}^2) \quad (5)$$

Где $R_{\text{тр}} = \frac{D_{\text{тр}}}{2}$, $r_{\text{тр}} = \frac{d_{\text{тр}}}{2}$ – наружный и внутренний радиусы трубы.

Выражая $R_{\text{тр}}$ и $r_{\text{тр}}$ через $D_{\text{тр}}$ и $d_{\text{тр}}$ соответственно, имеем для момента инерции сечения трубы относительно оси изгиба

$$J_{\text{отн.оси.изг.}} = \frac{\pi}{64} D_{\text{тр}}^4 (1 - \alpha^2)(1 + \alpha^2) + 4 \quad (6)$$

где $\alpha = \frac{d_{\text{тр}}}{D_{\text{тр}}}$ – относительный диаметр трубы.

Обычно α выбирается в пределах 0,8 ... 0,9.

Напряжение от изгиба в сечении наиболее опасных болтов фланца трубы. В результате момент инерции болтов:

$$J = \frac{\pi d_{\text{болт}}^4}{4} \sum_{i=1}^{12} d_i^2 \quad (7)$$

где d_i – расстояние от болтов до оси изгиба.

Момент сопротивления сечения болтов относительно оси изгиба:

$$W_{\text{сопр}} = \frac{J}{h_{\text{max}}} = 9r_{\text{фл}} F_{\text{болт}}, \text{М}^3 \quad (8)$$

Напряжение в сечении болтов от изгибающего момента, МПа, находится по формуле 9.

$$\sigma = \frac{M_{\text{изг}}}{W_{\text{сопр}}} \quad (9)$$

Таким образом, рассчитав напряжение в сечении болтов и максимальное расстояние до оси сгиба, возможно обнаружение наиболее опасных участков кольца. При создании башни важно учитывать точность изготовлений деталей для соединения между собой частей кольца. На сегодняшний день, после закрепления болтами отдельных частей башни, эти части в дальнейшем сваривают, что приводит к повышению прочностных особенностей конструкции, но также создает неудобства при монтаже. Для того чтобы исключить из производственного процесса сваривание, необходимо аккуратно и точно проделывать отверстия по заданному шагу по окружности на фланце кольца.

Методика контроля отклонения круглости составных колец ВЭУ

Измерение и контроль внутренних диаметров колец башен необходим для определения погрешности отклонения от круглости. Возникновение отклонения от круглости в дальнейшем может привести к неправильному свариванию частей башен между собой, из-за чего в конеч-

ном итоге могут возникнуть сложности при монтаже или в худшем случае может произойти разрушение конструкции. Измерение внутреннего диаметра необходимо, как и для минимизации дефекта отклонения от круглости так и определения расположения отверстий на торце кольца.

Контрольно-измерительный процесс для внутреннего диаметра проходит следующим образом:

Внутрь трубы, части башни, ставится штатив с лазерным дальномером. Сканер калибруется. Следом за этапом калибровки проводится этап сканирования с занесением результатов в компьютер. Пример контрольно-измерительного комплекса представлен на рисунке 7.

СХЕМА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИБОРА С ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМОЙ

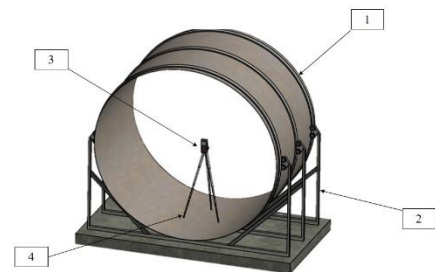


Рис. 7. Макет для измерения внутреннего диаметра кольца

- 1) составное кольцо ВЭУ;
- 2) базирование кольца в упоры;
- 3) прибор на основе лазерного дальномера; установка и расположение прибора

Таким образом, после серии сканирования внешней и внутренней части башни и обработки цифровых изображений, система получает данные с части поверхности объекта в виде массива («облака») точек. Для каждой точки известны ее трехмерные координаты.

На выполнение одного сканирования время и скорость движения каретки задается оператором, сидящего за компьютером и следящим за ходом выполнения процесса и после завершения сканирования всего объекта система выполняет обработку полученного массива точек, после чего можно приступать к анализу полученных результатов.

После проведения контрольно-измерительных процедур, обработки компьютером массива полученных данных, полученные результаты преобразуются в 3-х мерную модель, с которой в дальнейшем можно работать. Полученная модель позволяет метрологу выявить несоответ-

ствия изготовленной детали. Также при дальнейшем анализе будет происходить сравнение полученной модели с «эталонной», таким образом, метролог получит полную картину состояния объекта.

Измеряемый параметр, выбранной на данном этапе работы, это измерение отклонение от округлости формы башни.

При анализе результатов сканирования необходимо учитывать кроме влияния внешних факторов, таких как освещение, вибрации, чистота в помещении, температурный режим, квалифицированность оператора, погрешность, создаваемую испытательным стендом. Без учета данной погрешности, полученные данные следует считать недостоверными.

Внедрение подобных технологий ведет к снижению доли обнаруженного брака узлов продукции и, соответственно, снижению экономических затрат. Преимущества разработанной технологии для контроля внутреннего диаметра составного кольца башни ветрогенератора приведены в таблице 2.

Таблица 2. Преимущества разработанной технологии

Характеристики	Показатели
Точность контрольно-измерительных операций	0,1 мм
Погрешность измерения отклонения формы	± 150 мм
Геометрические характеристики объекта	Габаритные размеры св. 10 м
Стоимость	От 750 000 руб.
Обнаружение брака	В процессе производства

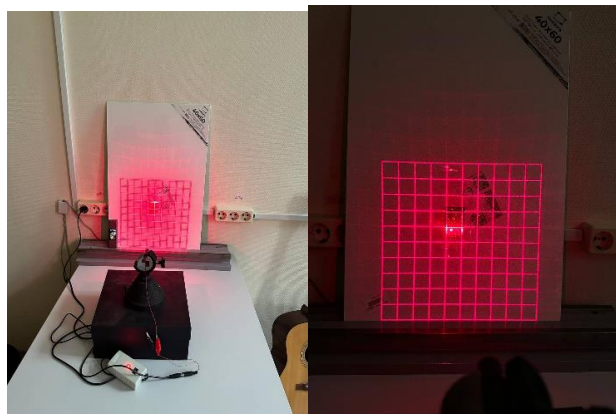


Рис. 8. Настройка лазерной сетки

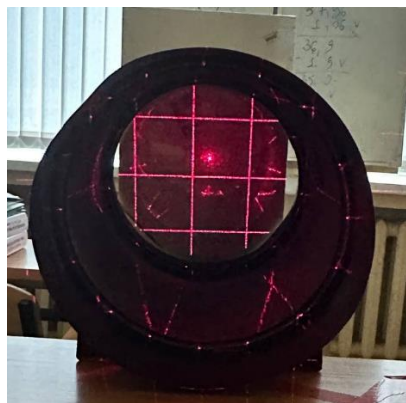


Рис. 9. Макет для измерения внутреннего диаметра кольца

В рамках программы «Умник» также был собран макет для сбора и обработки данных внутренних диаметров при сваривании между собой нескольких колец. Макет, как и для предыдущего объекта, основан на использовании лазерного модуля, рисунок 8 и 9.

На базе разработанных комплексов была разработана программа для ЭВ и получен патент ЭВМ № 2022610664 Российская Федерация. Программа по определению грубых погрешностей результатов многократных измерений.

Заключение

По данным информационного бюллетеня Ассоциации Развития Возобновляемой Энергетики (АРВЭ) состояние на июль 2023 года совокупная установленная мощность объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии, преодолела порог 6,0 ГВт. В структуре установленной мощности лидируют ветроэлектростанции и солнечные электростанции, на которые приходится 2,5 ГВт и 2,2 ГВт мощности. Сегодня на оптовом рынке электроэнергии и мощности функционируют 25 ветроэлектростанций в восьми субъектах РФ совокупной мощностью 2 360,0 МВт.

В статье описан новый усовершенствованный подход (технология) к проведению измерений (контроля) основных узлов ВЭУ с применением средств измерений на базе лазерных/оптических технологий. Внедрение подобных технологий ведет к снижению доли обнаруженного брака узлов продукции и, соответственно, снижению экономических затрат.

Приведены характеристики разработанных стендов, их экономическая целесообразность и эффективность.

Список литературы

1. Ember Global Electricity Review 2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/#supporting-material> (21.07.2023)
2. РЫНОК ОФФШОРНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ — РОСТ, ТЕНДЕНЦИИ, ВЛИЯНИЕ COVID-19 И ПРОГНОЗЫ (2023–2028 ГГ.) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/offshore-wind-energy-market> (21.07.2023)
3. Энергия ветра: как развивается возобновляемая энергетика, и когда она вытеснит уголь. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/sberbank/articles/737268/> (21.07.2023)
4. Заработала крупнейшая в мире ветряная электростанция. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ixbt.com/news/2022/09/02/zarabotala-krupnejshaja-v-mire-vetrjanaja-jel-ektrostancija.html> (21.07.2023)
5. Информационный бюллетень «Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития» [Электронный ресурс]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1ZtBclOpKApGmqGy7hq2g2ApP0iNU5qJi/view> (21.07.2023)
6. Статистика ВИЭ в России [Электронный ресурс]. URL: https://rreda.ru/statistics_of_renewable_energy_in_russia (21.07.2023)
7. ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОБЗОР РЫНКА ВИЭ В РОССИИ. I квартал 2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1cmB6rwmO--7skueEfsIRqzpsWLA7DLi9/view> (24.07.2023)
8. World energy issues monitor 2020 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.worldenergy.org/>, (13.09.2020);
9. Farahani, B. V., Barros, F., Sousa, P. J., Cacciari, P. P., Tavares, P. J., Futai, M. M., & Moreira, P. (2019). A coupled 3D laser scanning and digital image correlation system for geometry acquisition and deformation monitoring of a railway tunnel. *Tunneling and Underground Space Technology*, 91, 102995.
10. A. S. Komshin, K. G. Potapov, A. B. Syritsky, A. E. Fomin (2020). A system for monitoring hydro and wind power equipment based on intelligent measurement systems and neurodiagnostics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*
11. Тумакова, Е. В. Разработка измерительного комплекса обеспечения функционирования объектов энергетического машиностроения на базе фазохронометрических технологий в условиях Крайнего Севера / Е. В. Тумакова, А. С. Комшин, М. О. Синица // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отече-
ственных ученых - пионеров освоения космического пространства : сборник тезисов : в 4 т., Москва, 30 марта – 02 2021 года. Том 1. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – С. 351-356.
12. Sinitsa, M. O. Some Features of Measurements of Dynamic Characteristics of Heavy Machinery Objects During Operation in the Far North / M. O. Sinitsa, E. V. Tumakova, A. S. Komshin // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2022. – P. 592-602. – DOI 10.1007/978-3-030-85233-7_70.
13. Синица, М. О. Разработка технических средств контроля геометрии изделий общего и тяжелого машиностроения / М. О. Синица, Т. А. Осипов, А. С. Комшин // *Приборы*. – 2022. – № 11(269). – С. 14-21.
14. M.O. Sinitsa, I. S. Korzhenkov, A.S Komshin. Development of a system for controlling the geometry of products in heavy and general engineering by non - contact methods. *AIP Conference Proceedings* 2503(1):050042/ DOI: 10.1063/5.0099471
15. В США и Европе стали чаще ломаться и падать огромные ветрогенераторы: Новости+ [Электронный ресурс]. URL: https://news.rambler.ru/weapon/50077087/?utm_content=news_media&utm_medium=read_more&utm_source=copypink (просмотрено 25.07.2023)
16. Wind Turbine Blade Structural Engineering. *WE Handbook- 3- Structural Design*, 1-16 Синица, М. О. Повышение метрологического обеспечения лопастей ВЭУ больших размеров (от 60 м) на этапах производства / М. О. Синица // *Возобновляемые источники энергии : Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XII научной молодежной школы*, Москва, 24–25 ноября 2020 года / Ответственные редакторы С.В. Киселева, Ю.Ю. Рафинова. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА", 2020. – С. 372-383.

References

1. Ember Global Electricity Review 2023 [Electronic resource]. URL: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/#supporting-material> (07/21/2023)
2. OFFSHORE WIND POWER MARKET - GROWTH, TRENDS, IMPACT OF COVID-19 AND FORECASTS (2023–2028) [Electronic resource]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/offshore-wind-energy-market> (07/21/2023)
3. Wind energy: how renewable energy is developing and when it will displace coal. [Electronic resource]. URL: <https://habr.com/ru/companies/sberbank/articles/737268/> (07.21.2023)
4. The world's largest wind power plant began operating. [Electronic resource]. URL:

- krupnejshaja-v-mire-vetrjanaja-jel-ektrostancija.html (07/21/2023)
5. Information bulletin "Russian renewable energy market: current status and development prospects" [Electronic resource]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1ZtBclOpKApGmqGy7hq2g2ApP0iNU5qJi/view> (07/21/2023)
6. Statistics of renewable energy sources in Russia [Electronic resource]. URL: https://rreda.ru/statistics_of_renewable_energy_in_russia (07/21/2023)
7. QUARTERLY INFORMATION REVIEW OF THE RESEARCH ENERGY MARKET IN RUSSIA. I quarter 2023 [Electronic resource]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1cmB6rwmO--7skueEfsIRqzpsWLA7DLi9/view> (07/24/2023)
8. World energy issues monitor 2020 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.worldenergy.org/>, (13.09.2020);
9. Farahani, B. V., Barros, F., Sousa, P. J., Cacciari, P. P., Tavares, P. J., Futai, M. M., & Moreira, P. (2019). A coupled 3D laser scanning and digital image correlation system for geometry acquisition and deformation monitoring of a railway tunnel. *Tunneling and Underground Space Technology*, 91, 102995.
10. S. Komshin, K. G. Potapov, A. B. Syritsky, A. E. Fomin (2020). A system for monitoring hydro and wind power equipment based on intelligent measurement systems and neurodiagnostics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*
11. Tumakova, E. V. Development of a measuring complex for ensuring the functioning of power engineering facilities based on phase-chronometric technologies in the conditions of the Far North / E. V. Tumakova, A. S. Komshin, M. O. Sinitsa // *XLV Academic Readings on cosmonautics, dedicated to the memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists - pioneers of space exploration: collection of abstracts: in 4 volumes, Moscow, March 30 - 02, 2021. Volume 1. – Moscow: MSTU Publishing House. N.E. Bauma-na, 2021. – pp. 351-356.*
12. Sinitsa, M. O. Some Features of Measurements of Dynamic Characteristics of Heavy Machinery Objects During Operation in the Far North / M. O. Sinitsa, E. V. Tumakova, A. S. Komshin // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2022. – P. 592-602. – DOI 10.1007/978-3-030-85233-7_70.
13. Sinitsa, M. O. Development of technical means for monitoring the geometry of general and heavy engineering products / M. O. Sinitsa, T. A. Osipov, A. S. Komshin // *Instruments*. – 2022. – No. 11(269). – pp. 14-21.
14. M.O. Sinitsa, I. S. Korzhenkov, A. S Komshin. Development of a system for controlling the geometry of products in heavy and general engineering by non-contact methods. *AIP Conference Proceedings* 2503(1):050042/ DOI: 10.1063/5.0099471
15. In the USA and Europe, huge wind generators began to break down and fall more often: News+ [Electronic resource]. URL: https://news.rambler.ru/weapon/50077087/?utm_content=news_media&utm_medium=read_more&utm_source=copy-link (viewed 07/25/2023)
16. Wind Turbine Blade Structural Engineering. WE Handbook- 3- Structural Design, 1-16 Sinitsa, M. O. Increasing metrological support for large wind turbine blades (from 60 m) at the production stages / M. O. Sinitsa // *Renewable energy sources: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation and the XII Scientific Youth School, Moscow, November 24–25, 2020 / Responsible editors S.V. Kiseleva, Yu.Yu. Rafikova. – Moscow: Limited Liability Company "NAUKA PUBLISHING HOUSE", 2020. – P. 372-383.*

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 662.638

Исследование закономерности зажигания и горения топливных пеллет, выполненных из различных типов древесины

А.К. Асильбеков¹, А.В. Губин², К.Б. Ларионов^{1,3,4}¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, 634050, Россия, e-mail: avg77@tpu.ru; aka2@tpu.ru²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия, e-mail: avgubin@sevsu.ru³ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева», Кемерово, 650000, Россия, e-mail: asg47@tpu.ru⁴ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС», Москва, 119049, Россия, e-mail: laryk070@gmail.com

Статья поступила 19.09.2023 г.; после доработки 20.09.2023 г.

Аннотация

Исследованы физико-химические характеристики и процесс горения образцов отходов лесотехнической промышленности, спрессованных в древесные пеллеты. Исследуемые образцы, характеризовались схожими техническими характеристиками и элементным составом. Методом термического анализа установлено, что основная потеря массы происходит в температурном интервале 290-400 °C, что связано с разложением целлюлозы

Ключевые слова: древесные отходы, пеллеты, термическое разложение, зажигание и горение, газофазные продукты

Research of the patterns of ignition and combustion of fuel pellets made from various types of wood

A.K. Asilbekov¹, A.V. Gubin², K.B. Larionov^{1,3,4}¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia, e-mail: avg77@tpu.ru; aka2@tpu.ru²Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: avgubin@sevsu.ru³T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russia, e-mail: asg47@tpu.ru⁴National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, 119049, Russia, e-mail: laryk@tpu.ru

Received 19.09.2023 y.; received in final form 20.09.2023 y.

Abstract

The physicochemical characteristics and combustion process of samples of waste from the forestry industry pressed into wood pellets were researched. The studied samples were characterized by similar technical characteristics and elemental composition. Using the method of thermal analysis, it was established that the main weight loss occurs in the temperature range of 290-400 °C, which is associated with the decomposition of cellulose

Keywords: wood waste, pellets, thermal decomposition, ignition and combustion, gas-phase products

Введение

Современного человека ежедневно окружает множество изделий, созданных из дерева: посуда, мебель, элементы декора и т.д. Все это

существует благодаря росту развития лесотехнической промышленности. Но, как и в любой отрасли промышленности, главной проблемой является утилизация отходов, образование которых происходит во всех сферах производства,

будь то заготовка древесины, ее обработка и переработка и т.д. [1]. Особое внимание стоит уделить и отходам, образованным жизнедеятельностью человека. После износа старой мебели, в большинстве случаев, она направляется на свалку. По данным [2] в 2020 году объем твердых коммунальных отходов составил 48,5 млн. тонн, 40 % из которых – органические отходы. По итогам этого же периода, из всего числа отходов всего 24,1 тыс. тонн было направлено на получение электрической или тепловой энергии, оставшаяся часть была захоронена. Это может привести к пагубному влиянию на окружающую среду, повышению пожароопасности мест складирования, а также антропогенному влиянию на здоровье людей. Следовательно, требуется разработка методик по эффективной утилизации данного вида отходов.

Существуют множество путей утилизации лесотехнических отходов: использование в строительстве [3], создание термопластов [4], создание композиционных материалов [5] и прочее. В связи с ростом цен на ископаемые виды топлива, использование биомассы в качестве возобновляемого источника энергии является перспективным методом утилизации.

В данной работе представлено исследование характеристик загорания и горения древесных пеллет, выполненных из различных видов хвойных и лиственных деревьев, а также старой мебели. Также проведен анализ газофазных продуктов сгорания утилизируемых отходов. Оценка изменения реакционных характеристик осуществлена посредством проведения термического анализа образцов.

Материалы и методы

В качестве исследуемых образцов были использованы опилки: ели, берёзы, сосны, лиственница и отходы мебельного производства, которые были взяты в окрестности Томской области. Технические характеристики (влажность, зольность, выход летучих соединений и низшая теплота сгорания) опилок определялись согласно стандартным методикам ГОСТ 9516-92, ГОСТ 11022-95, ГОСТ Р 55660-2013 и ГОСТ 147-2013 соответственно.

Элементный состав был определен с использованием анализатора элементного состава Flash 2000 CHNS (Thermo Fisher Scientific, США). Для экспериментальных исследований исходный образец измельчался и фракционировался с использованием сит с размером ячеек ме-

нее 80 мкм. Далее образец пеллетировался с использованием гидравлического пресса, где давление на одну пеллету составляло около 2 т. Диаметр подготовленных пеллет составлял около 10 мм, высота 12 мм.

В таблицах 1, 2 представлены физико-химические характеристики исследуемых образцов.

Особенностью древесины является отсутствие в элементном составе серы (S), а соответственно, при их горении исключается и образование SO_2 . Самое большое значение теплоты сгорания наблюдается для образца выполненного из ели ($Q_r^i = 19$ МДж/кг), что обусловлено наибольшим содержанием несвязанного углерода ($C^d = 49,3$) и относительно низкого содержания зольного остатка ($A^d = 0,6$ масс. %).

Таблица 1. Технические характеристики исследуемых образцов

Образец	Влажность, W^r	Зольность, A^d	Летучие вещества, V^{daf}	Теплота сгорания, Q_r^i
	масс. %	масс. %	масс. %	МДж/кг
Ель	5,6	0,6	68	19,0
Береза	9,8	0,1	74	17,6
Сосна	6,7	0,9	71	18,2
Лиственница	2,1	0,6	69	17,2
Мебель	7,1	1,0	69	17,9

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

Таблица 2. Элементный состав исследуемых образцов

Образец	Элементный состав ^{d} , %				
	C	H	N	S	O
Ель	49,3	6,2	0,6	-	43,9
Береза	45,5	5,9	0,4		48,2
Сосна	47,4	5,8	0,5		46,3
Лиственница	47,4	5,9	0,7		46
Мебель	45,0	6,0	5,6		43,4

В таблице 3 представлен элементный состав зольного остатка исследуемых образцов, определенный с помощью спектрометра S1 Titan (Bruker, США).

Для исследуемых образцов был выполнен термический анализ, с применением STA 449 C Jupiter (Netzsch, Германия). Все эксперименты проводились в потоке аргона с расходом 100

мл/мин, при скорости нагрева $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в корундовом тигле с перфорированной крышкой в интервале температур $25\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3. Элементный состав золы исследуемых образцов

Образец	Fe	Mo	Si	Ti	In
Ель	18,69	0,3	36,74	1,59	3,66
Береза	10,21	61,7	2,47	10,61	1,45
Сосна	18,64	26,71	25,54	4,62	3,04
Лиственница	18,61	0,51	38,24	1,29	9,66
Мебель	22,69	0,53	6,4	46,67	2,28

* – другие элементы, содержащиеся в зольном остатке, составляют около 10% мас.

Оценка реакционной способности топлив была выполнена с применением лабораторного стенда слоевого сжигания твердого топлива [6]. Эксперимент был выполнен при температуре греющей среды $T_g = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты и обсуждения

На рисунках 1 и 2 представлены результаты термического анализа исследуемых образцов.

Профили ТГ и ДТГ, представленные на рисунке 1 имеют схожую тенденцию из-за близких по значениям характеристик и элементного состава исследуемых образцов (табл. 1-2). Изменение массы для всех представленных образцов составило 59-65 масс. % (рис. 1а), что сопоставляется с данными о влажности и выходе летучих соединений (таблица 1). Температура начала интенсивного термического разложения составляет $T_d = 213\text{--}234\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рисунке 1б видно, что функция изменения скорости изменения массы имеет бимодальную форму. Первый максимум на профиле ДТГ вызван удалением влаги, а второй (при температуре $200\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$) – за счет сублимации и выделения летучих веществ. В целом процесс термического преобразования исследуемых образцов в данном температурном интервале можно связать с разложением основных структурных компонентов биомассы: гемицеллюлоза ($200\text{--}370\text{ }^{\circ}\text{C}$), целлюлоза ($275\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$) и в меньшей степени лигнина (свыше $400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Таким образом, основной пик обусловлен преимущественно удалением целлюлозы, а плечевой пик может быть отнесен к термическому разложению гемицеллюлозы. Полученный остаток состоит из углерода и золы.

В таблице 4 представлены параметры процесса термического разложения исследуемых образцов.

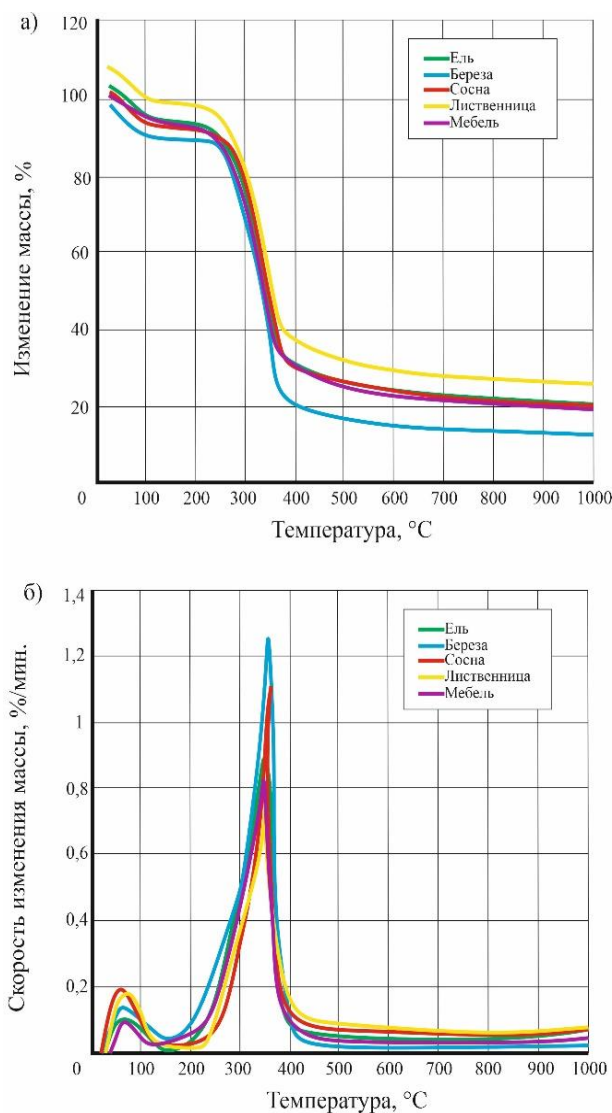


Рис. 1. Данные ТГ(а) и ДТГ(б) исследуемых образцов

Максимальные значения скорости изменения массы $w_{\max} = 1,1$ и $1,3$ масс.%/мин наблюдаются для образцов сосны и березы соответственно. Для других образцов значение $w_{\max}$ составило около $0,8\text{--}0,9$ масс%/мин. При этом температура $T_{\max}$ (соответствующая $w_{\max}$) определяется в достаточно узком интервале $344\text{--}352\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 2 представлены результаты определения значений времен задержки зажигания и пламенного горения исследуемых образцов с помощью высокоскоростной видеосъемки.

Время задержки зажигания τ_i для всех исследуемых образцов определяется идентичными значениями, что обусловлено схожестью их физико-химических характеристик. При этом наибольшее значение параметра τ_i прослеживается для образца сосны ($\tau_i = 2,5 \pm 0,2$ с.), а наименьшее для образца ели ($\tau_i = 2,3 \pm 0,2$ с.).

Таблица 4. Параметры процесса термического разложения исследуемых образцов. Вычислены по данным ДТА.

Параметр	Образец				
	Ель	Береза	Сосна	Лиственница	Мебель
T_d	213	232	234	223	213
T_f	365	367	374	383	360
ω_{max}	0,94	1,26	1,12	0,89	0,87
T_{max}	350	350	352	350	344

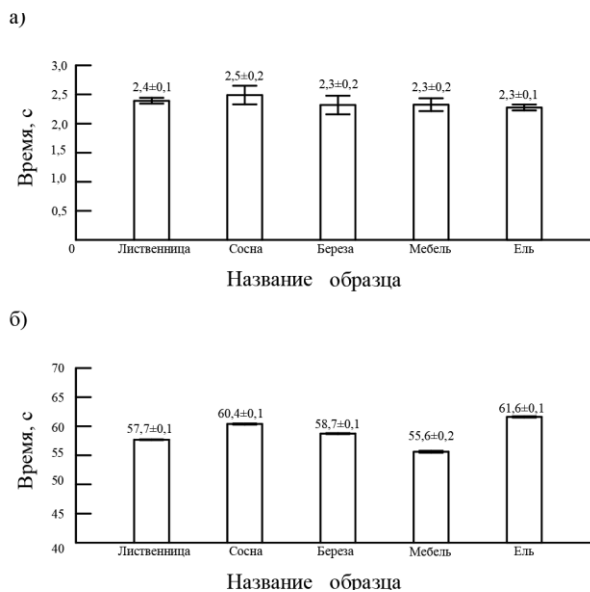


Рис. 2. Время задержки зажигания (а) и время пламенного горения (б) образцов древесины, полученные с помощью скоростной видеосъемки

Обоснование экологической целесообразности термической переработки отходов лесотехнической промышленности проводилось с помощью анализа газофазных продуктов термического разложения (CO_2 , CO , NO_x). Результаты представлены на рис. 3.

На рис. 3 видно, что профиль эмиссии CO_2 и CO имеет схожую тенденцию у всех образцов из-за близкого содержания углерода ($C^d = 45 - 49,4\%$). Различие видов древесных отходов оказало значительное влияние на эмиссию оксидов азота NO_x (рис. 3в). Наибольшее значение наблюдалось у образца мебели, так как в его элементарном составе содержится наибольшее значение азота ($N^d = 5,6\%$), способного окисляться до соответствующих оксидов.

На рисунке 4 представлены типичные кадры высокоскоростной видеосъемки зажигания и последующего развивающегося пламенного горения исследуемых образцов. При вводе в камеру сгорания топлива инициируется интенсивное

выделение летучих соединений, которые образуют газовое облако вокруг объема пеллеты, что приводит к ее зажиганию и дальнейшему развитию устойчивого горения.

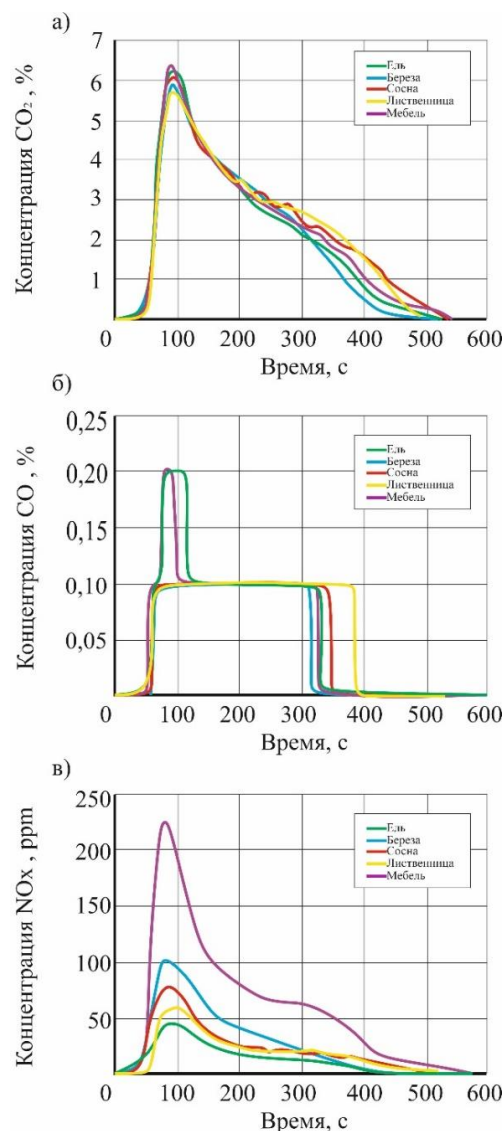


Рис. 3. Зависимости выделения газофазных продуктов горения (а – CO_2 , б – CO , в – NO_x) от времени процесса горения исследуемых образцов.

Сопоставляя данные термического анализа (рисунок 1) и высокоскоростной видеосъемки (рисунок 4) можно выделить ряд стадий физико-химического превращения: инертный нагрев, испарение внешней и связанной влаги, термическая деструкция с выделением летучих соединений, смешение горючих газов с окислительной средой и зажигание с последующим горением в гетерогенном режиме. При этом зажигание образца сопровождается с образованием видимого пламени вблизи топливной пеллеты. Это связано

с выделением относительно большого количества горючих соединений (CO , C_xH_y , H_2), образующихся в процессе термической деструкции частиц древесины и высвобождения летучих соединений.

По завершению интенсивного выделения летучих соединений, режим пламенного горения переходит в стадию окисления образовавшегося коксового остатка. Также по данным высокоскоростной видеосъемки для всех исследуемых образцов с истечением времени горения происходит повышение интенсивности свечения, что связано с ростом температуры.

Важно отметить, что на ранней стадии, процесс горения сопровождался периодическим образованием микровзрывов. Образующиеся микровзрывы имеют внешнее сходство с горением твердых дисперсных горючих систем. Данный эффект можно объяснить выделением относительно большого количества горючих газов (CO , H_2 , CH_4), проходящих через свободные пространства (поры и каналы) топливной пеллеты, которые раскрываются в процессе их термического разложения. Также интенсивный поток газов способствует уносу мелких частиц с поверхности топливной пеллеты, которые впоследствии загораются и горят во взвешенном состоянии.

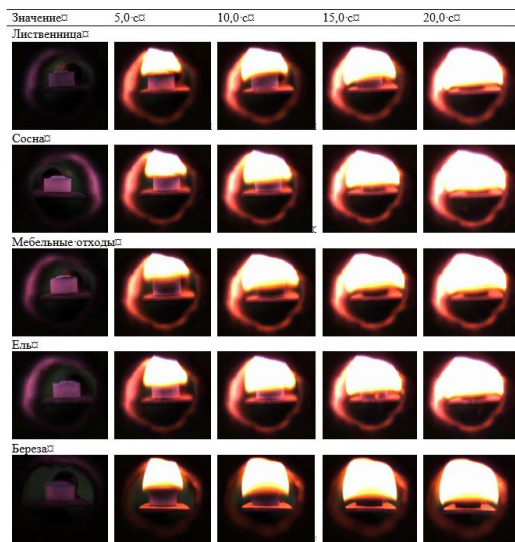


Рис. 4. Типичные кадры высокоскоростной видеосъемки зажигания и горения исследуемых образцов пеллет, выполненных из древесных отходов.

Заключение

В работе исследованы физико-химические характеристики отходов лесотехнической промышленности, определены характеристики термического разложения образцов, выполнена

оценка их реакционной способности и визуализированы процессы зажигания и пламенного горения.

Максимальная разница реакционной способности, оценка которой осуществлялась по вычисленным данным времени задержки зажигания, составила 8%.

По данным анализа газофазных продуктов сгорания установлено, что образец мебели имеет наибольшее значение эмиссии оксидов азота. В свою очередь для других образцов выделение данных оксидов было существенно ниже (в 2 раза). Наименьшее значение выделения NO_x наблюдалось для образца, выполненного из ели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проектов №075-03-2023-045/1 (FZES-2021-0008) и №075-00268-20-02 (FSME-2020-0040).

Список литературы

1. Степанов В.И., Мезина Н.А. Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве // Вестник РЭА им. Г. В. Плеханова. 2012. №3.
2. ТАСС [Электронный ресурс]: Что известно о реформе отрасли обращения с отходами в России. Режим доступа: URL <https://tass.ru/info/11787987> (дата обращения 12.09.2023)
3. Смертин, Н. В. Актуальность применения отходов лесной и сельскохозяйственной промышленности при производстве строительных материалов / Н. В. Смертин, С. Н. Долматов // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 04–05 июня 2020 года / Ответственные редакторы Ю.А. Безруких, Е.В. Мельникова. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2020. – С. 243-246.
4. Макарычев, С. В. Теплофизические свойства термопластов, изготовленных на основе древесины из отходов лесной промышленности / С. В. Макарычев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 6(128). – С. 139-142.
5. Кочева, М. Н. Использование древесных отходов в лесной промышленности и разработка предложений по переработке их на предприятиях Республики Коми / М. Н. Кочева // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2016. – Т. 20, № 3. – С. 35-40.
6. Slyusarsky K.V. Tolokolnikov, Anton Gubin A.V.,

Kaltaev A.Zh., Gorshkov A.S., Asilbekov A.K., Larionov, K. B. Ignition and Emission Characteristics of Waste Tires Pyrolysis Char Co-Combustion with Peat and Sawdust. *Energies*. 16. 4038. 10.3390/en16104038.

References

1. Stepanov V.I., Mezina N.A. Forest industry waste and its use in the national economy // *Vestnik REA im. G. V. Plekhanov*. 2012. No. 3.
2. TASS [Electronic resource]: What is known about the reform of the waste management industry in Russia. Access mode: URL <https://tass.ru/info/11787987> (access date 09.12.2023)
3. Smertin, N.V. Relevance of the use of forestry and agricultural industry waste in the production of building materials / N.V. Smertin, S.N. Dolmatov // *Innovations in the chemical forestry complex: trends and development prospects: Collection of materials of the All-Russian scientific- practical conference, Krasnoyarsk, June 04–05, 2020 / Responsible editors Yu.A. Bezrukikh, E.V. Melnikova. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev”, 2020. – P. 243-246.*
4. Makarychev, S. V. Thermophysical properties of thermoplastics made on the basis of wood from forest industry waste / S. V. Makarychev // *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. – 2015. – No. 6(128). – pp. 139-142.
5. Kocheva, M. N. The use of wood waste in the forest industry and the development of proposals for their processing at enterprises of the Komi Republic / M. N. Kocheva // *Bulletin of the Moscow State Forest University - Forest Bulletin*. – 2016. – T. 20, No. 3. – P. 35-40.
6. Slyusarsky K.V. Tolokolnikov, Anton Gubin A.V., Kaltaev A.Zh., Gorshkov A.S., Asilbekov A.K., Larionov, K. B. Ignition and Emission Characteristics of Waste Tires Pyrolysis Char Co-Combustion with Peat and Sawdust. *Energies*. 16. 4038. 10.3390/en16104038.

УДК 662.62:662.75:662.94

Экспериментальные исследования влияния кавитационной обработки водоугольных топлив в составе с пирогенетической жидкостью на их свойства

Д.В. Гвоздяков¹, А.В. Зенков², Л.И. Мальцев³, Ю.С. Поджаров⁴^{1,2}Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия, dim2003@tpu.ru, avz41@tpu.ru^{3,4}Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия, maltzev@itp.nsc.ru, yura_p@ngs.ru

Статья поступила 15.09.2023 г.; после доработки 18.09.2023 г.

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния пирогенетической жидкости в составе водоугольных топлив и их кавитационной обработки на изменения вязкости, стабильности, гранулометрического состава. Введение в состав водоугольного топлива пирогенетической жидкости приводит к замедлению осаждения угольной массы. Кавитационная обработка водоугольных топлив и добавка в их состав пирогенетической жидкости в совокупности обеспечивают положительные характеристики таких перспективных для промышленной энергетики топлив.

Ключевые слова: бурый уголь, пирогенетическая жидкость, водоугольное топливо, вязкость, кавитация, седиментация.

Experimental studies of the effect of cavitation treatment of coal-water fuels in composition with pyrogenetic liquid

D.V. Gvozdyakov¹, A.V. Zenkov², L.I. Maltsev³, Yu. S. Podzharov⁴^{1,2}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia, dim2003@tpu.ru, avz41@tpu.ru^{3,4}S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia, maltzev@itp.nsc.ru, yura_p@ngs.ru

Received 15.09.2023 y.; received in final form 18.09.2023 y.

Abstract

The results of experimental studies of the effect of pyrogenetic liquid in the composition of coal-water fuels and their cavitation treatment on changes in viscosity, stability, and granulometric composition are presented.

The introduction of pyrogenetic liquid into the composition of coal-water fuel leads to a slowdown in the deposition of coal mass. Cavitation treatment of coal-water fuels and the addition of pyrogenetic liquid to their composition together provide positive characteristics of such promising fuels for industrial power engineering.

Keywords: lignite, pyrogenetic liquid, coal-water fuel, viscosity, cavitation, sedimentation

Введение

Водоугольное топливо (ВУТ) представляет из себя жидкое смесевое топливо, состоящее из измельченного угля, воды и добавок поверхностно-активных веществ (ПАВ) [1]. Широкую популярность такое топливо получило во второй

половине 20 века как альтернатива традиционным котельным топливам – нефть, мазут [2]. Положительными качествами ВУТ принято считать: пожаро- и взрывобезопасность – отсутствует сухая угольная пыль [3], экологичность – при сжигании в атмосферу выбрасывается меньше соединений вредных веществ из-за при-

сутствия паров воды [4], независимость от поставок нефти – месторождения угля более равномерно распределены по континентам [5], показатели логистики – возможность доставлять на тепловую электростанцию автомобильным, железнодорожным и морским транспортом, по трубопроводам [6], стабильность – можно хранить достаточно длительное время без опасности расслоения, характерного для жидкостей в составе с взвешенными твердыми частицами [7], низкая стоимость – в качестве твердой компоненты можно использовать отходы (фильтр-кек) угольнообогащительных фабрик [8], универсальность – использовать на мазутных и пылеугольных котлах [9]. Несмотря на внушительный перечень положительных качеств водоугольных топлив есть причины, сдерживающие их широкое внедрение в теплоэнергетику. Одной из главных является процесс распыления, существенно отличающийся от нефти, мазута и дизельного топлива.

После распыления ВУТ, независимо от типа устройства распыления, как правило, образуются достаточно крупные капли [10]. Объясняется это прежде всего высокой вязкостью водоугольного топлива, например, в сравнении с котельным мазутом. Последний, как известно, предварительно нагревается с целью снизить вязкость. В случае с ВУТ термическая подготовка окажет незначительное влияние. Поэтому на практике вязкость ВУТ при распылении достаточно высокая.

Например, в [11] отмечается, что рекомендуемое значение динамической вязкости водоугольного топлива для распыления составляет 1000-1200 мПа·с при скорости сдвига шпинделя вискозиметра 100 с⁻¹. Это достаточно высокое значение, в сравнении с вязкостью разогретого мазута – 20-50 мПа·с. В результате высоких значений вязкости диаметр капель ВУТ после распыления достаточно велик и может достигать нескольких миллиметров.

В качестве компонент ВУТ используется достаточно широкий спектр материалов. Например, отходы нефтепереработки, сточные воды. Но при этом, современными исследователями не изучается влияние пирогенетической жидкости (ПЖ) на свойства и характеристики ВУТ. Это вещество является отходом пиролизных процессов, в частности, при производстве древесного угля. Последний достаточно широко используется в качестве топлива для котлов малой и средней мощности. Древесный уголь как правило изготавливают из прессованных опилок или щепы. Образующаяся в процессе пиролиза древесины

ПЖ содержит в себе различные соединения фенолов и кислот [12], поэтому прямая утилизация в систему канализации запрещена. При этом жидкость обладает калорийностью, примерно 1-4 МДж/кг в зависимости от технологических условий процесса пиролиза. Одним из вариантов ее утилизации является сжигание путем подмешивания к традиционным жидким топливам, например, мазут или ВУТ.

Предложенная авторами статьи третья компонента ВУС - ПЖ обладает значением вязкости в 2-2,5 раза больше, чем у обычной воды. Замещающая часть обычной воды на ПЖ вязкость новой суспензии увеличится. Поэтому для практического использования такого трехкомпонентного водоугольного топлива необходимо применить мероприятие, направленное на снижение его вязкости или не допустить его существенного увеличения. Одним из таких способов является кавитационная обработка ВУТ. Она позволяет гомогенизировать топливо, улучшить стабильность (исключить расслоение при хранении или транспортировке).

Целью работы являются экспериментальные исследования влияние пирогенетической жидкости в составе водоугольных топлив на основе бурого угля и кавитационной обработки на их свойства – вязкость, стабильность, гранулометрический состав и обоснование эффективности использования такого топлива в промышленной энергетике.

Компоненты водоугольных топлив и его приготовление

Для приготовления водоугольных использовался бурый уголь (характеристики представлены в таблице 1), обычная вода и ПЖ. Подготовка лигнита для ВУС состояла из нескольких стадий: дробление крупнокускового угля в щековой дробилке до фракции характерным размером не более 30-40 мм; тонкий помол в дезинтеграторе до фракции характерным размером не более 2 мм; просеивание через вибрационные сита до размера фракции не более 200 мкм.

Таблица 1. Бурый уголь

Параметр	Значение
Выход летучих веществ, %	47,0
Влажность, %	26,0
Зольность, %	5,3
Содержание серы, %	0,27
Теплотворная способность, ккал/кг	4200

На первом этапе подготовка смесей осуществлялась простым смешиванием компонентов в нужном соотношении в отдельных емкостях. После чего топливные смеси ВУТ подвергались кавитационной обработке на роторном гидродинамическом генераторе кавитации (РГДГК), разработанном в ИТ СО РАН. Характеристики твердой компоненты ВУС представлены в таблице 2.

Таблица 2. Водоугольные топлива

Компонента	Топливная смесь 1	Топливная смесь 2	Топливная смесь 3
Уголь, % по массе	50	45	40
Вода, % по массе	50	45	40
ПЖ, % по массе	0	10	20

Эффективность такого способа обработки исследовавшихся ВУТ объясняется тем, что при кавитационном воздействии частицы угля в составе водоугольного топлива дополнительно разрушаются. Вызвано это схлопыванием паровых микропузырьков, возникающих возле частицы угля. Такой способ обработки ВУТ в составе с ПЖ способствует гомогенизации пирогенетической жидкости. В первоначальном виде в составе ПЖ присутствуют крупные нерастворенные фрагменты пиролизного масла. На рис. 1 представлен используемый при проведении экспериментов роторный гидродинамический генератор кавитаций.

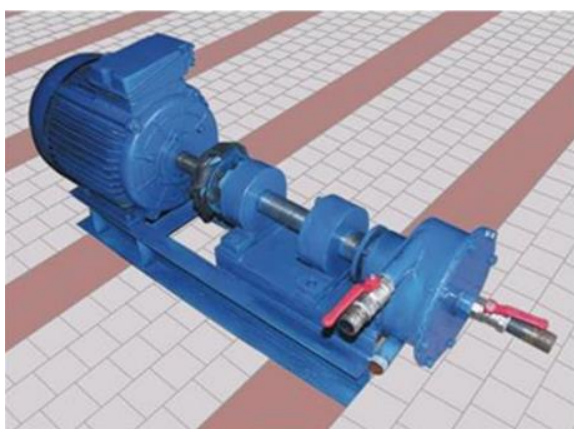


Рис. 1. Роторный гидродинамический генератор кавитации.

Исследования седиментационных свойств топливных смесей ВУТ выполнялись на специализированном стенде: две колонки диаметром

100 мм и высотой 1500 мм. По высоте колонок через 250 мм друг от друга установлены патрубки (нижние отборники установлены на расстоянии 20 мм от доннышек колонок), из которых через определенный интервал времени в течение 20 дней производился отбор проб и, путем сушки и взвешивания, определялось содержание угольной массы в пробах. Также осуществлялись измерения вязкости ВУТ с разных уровней колонн. Во избежание возникновения погрешностей, обусловленных испарением воды, в верхней части колонки герметично закрыты.

При проведении экспериментов кавитационная обработка ВУТ на роторном гидродинамическом генераторе кавитаций осуществлялась в течении 30 и 60 с.

Динамическая вязкость исследовавшихся топливных смесей ВУТ измерялась при помощи ротационного вискозиметра Реотест-2.

Результаты и их обсуждение

После подготовки топливных смесей в нужном соотношении компонент в отдельных емкостях (таблица 1) визуально было установлено, что образец ВУТ №3 обладает достаточно сильной вязкостью и его обработка в роторном гидродинамическом кавитаторе будет невозможна. Снижение количества ПЖ в составе ВУТ до 15% по массе также показало, что уже после смешения компонент в нужном соотношении в отдельной емкости топливо обладает высокой вязкостью. По этой причине сделан вывод о том, что введение в состав ВУТ более 15% по массе ПЖ при замещении ею угля и воды является нецелесообразным с точки зрения текучести топлива. Дальнейшие эксперименты по изучению вязкости ВУТ проводились с топливными смесями, в составе которых количество ПЖ не превышало 10% по массе.

После приготовления топливных смесей №1 и №2 в нужном соотношении компонент в отдельных емкостях эти смеси были подвергнуты кавитационной обработке в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций в течение 30 и 60 секунд. После этого из каждой смеси отобраны образцы топливных смесей ВУТ (I-IV), и через 24 часа при комнатной температуре измерена их динамическая вязкость. Результаты представлены на рис. 2.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что введение в состав водоугольного топлива 10% ПЖ приводит к увеличению вязкости на 29% не смотря на уменьшение количества угля. Определено, что увеличение

времени обработки ВУТ в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций приводит к уменьшению вязкости. Так, при увеличении времени обработки с 30 с до 60 с снижение вязкости для состава №1 составило в среднем 6%, для состава №2 – 7%.

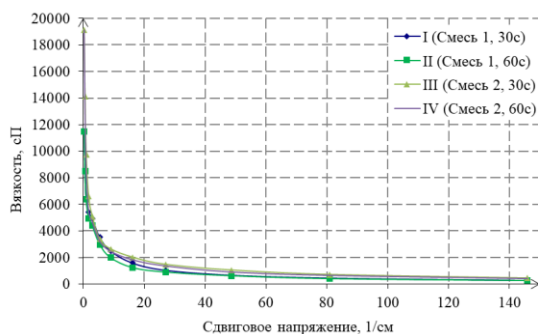


Рис. 2. Зависимость вязкости (сПу) ВУТ №1 и №2 от сдвигового напряжения (1/с).

Далее были проведены исследования седиментационных свойств топливных смесей №1 и 2. Колонна №1 заполнялась топливной смесью №1, а колонна №2 водоугольным топливом в составе с ПЖ (таблица 1). Отборы проб и измерение значений их динамической вязкости осуществлялось на 24 день после заполнения колонн водоугольными топливами. Образцы ВУТ отбирались из патрубков на высоте 750 (патрубок №3), 1000 (патрубок №4) и 1250 мм (патрубок №5). Результаты измерений представлены ниже на рис. 3 и 4.

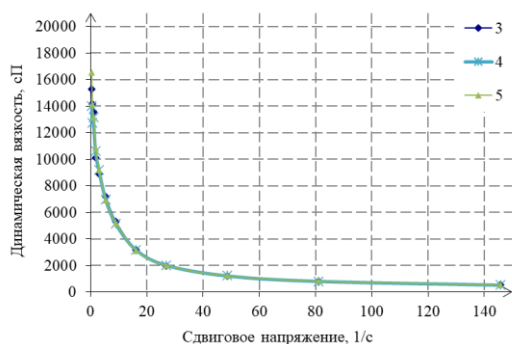


Рис. 3. Зависимость вязкости (сПу) ВУТ №1 от сдвигового напряжения (1/с).

Результаты исследования динамической вязкости показали, что через достаточно длительный период выдержки обработанных в роторном гидродинамическом кавитаторе в течение 30 и 60 с топливных смесей ВУТ №1 и 2 динамическая вязкость топлив практически не из-

менилась. Более подробные результаты эксперимента представлены в таблице 3.

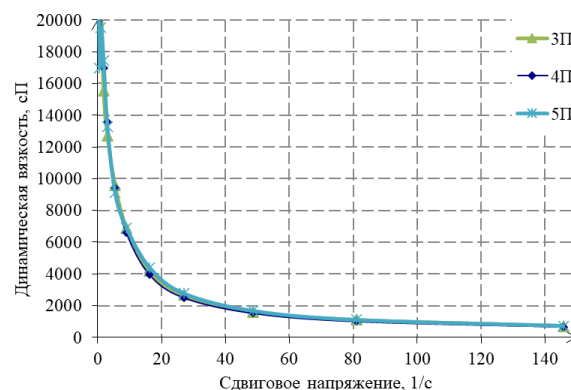


Рис. 4. Зависимость вязкости (сПу) ВУТ №2 от сдвигового напряжения (1/с).

Таблица 3. Изменения динамической вязкости ВУТ

Dr	3	4	5	3П	4П	5П
	10 ⁻³ сПу					
0.3	15,3	14,0	16,6	23,0	25,4	20,4
0.6	14,1	12,7	14,1	21,2	22,6	17,0
1.0	13,6	13,1	13,1	21,2	20,3	19,5
1.8	10,1	10,6	10,8	15,6	17,0	17,4
3.0	8,9	9,2	9,2	12,7	13,6	13,3
5.4	7,1	7,0	7,0	9,6	9,4	9,1
9.0	5,3	5,1	5,2	6,9	6,6	6,9
16.2	3,2	3,2	3,1	4,2	4,0	4,4
27.0	2,0	2,0	1,9	2,7	2,5	2,8
48.6	1,2	1,2	1,2	1,6	1,5	1,7
81.0	0,8	0,8	0,8	1,1	1,0	1,1
145.8	0,5	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7

Таким образом, можно сделать вывод о том, что кавитационная обработка исследовавшихся топливных смесей – двухкомпонентное ВУТ и водоугольное топливо в составе с ПЖ в количестве 10% по массе обеспечивает хорошую стабильность топлива на протяжении длительного времени.

Результаты исследований дисперсного состава двухкомпонентного ВУТ, не обработанного в роторном гидродинамическом кавитаторе и топливных смесей обработанных в роторном гидродинамическом кавитаторе в течение 30 и 60 с топливных смесей ВУТ №1 и 2 показаны на рис. 5-7. Исследования выполнены путем промывки водой проб ВУТ. Образец топливной смеси помещался на верхнее из ряда сит, установленных одно над другим, с условием уменьшения размера ячеек, и взвешивания сухого

остатка на каждом сите. На рис. 5-7 приняты следующие обозначения:

q – массовая доля частиц диаметром d , в % (остаток на соответствующем сите);

Q – массовая доля частиц диаметром $D \geq d$, в % (сумма остатка на данном сите и всех более крупных ситах).

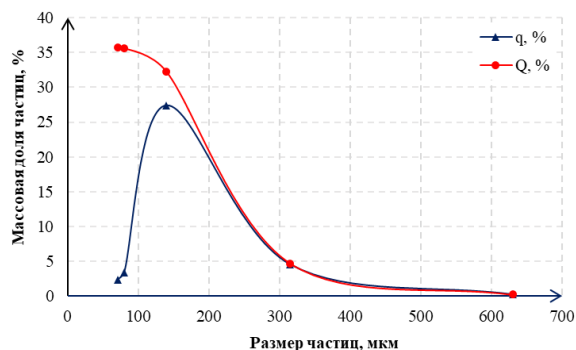


Рис. 5. Дисперсный состав угольной массы из ВУТ без ПЖ и без кавитационной обработки.

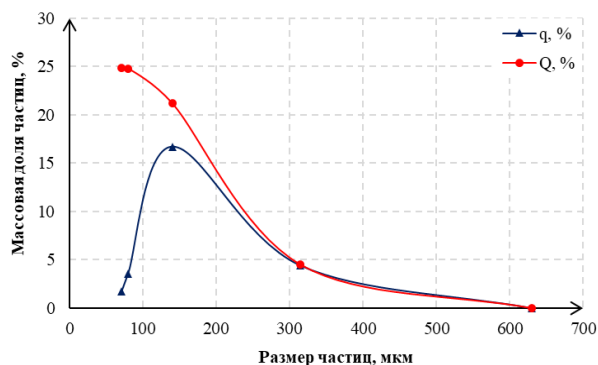


Рис. 6. Дисперсный состав угольной массы из ВУТ без ПЖ с кавитационной обработкой (топливная смесь №2).

Анализ результатов исследования влияния кавитационной обработки ВУТ на дисперсный состав ее твердой компоненты показал, что она позволяет повысить дисперсность угольной массы как при добавлении ПЖ к ВУТ, так и без нее, при этом влияние самой ПЖ на тот же результат незначительно.

Также, при проведении экспериментов выполнен анализ динамики изменения содержания угольной массы в топливных смесях. На рис. 8 представлены результаты, иллюстрирующие насколько интенсивно происходит оседание частиц угля в исследовавшихся ВУТ в зависимости от их состава (топливная смесь №1 и №2) и времени (на 24 день после помещения топливных смесей №1 и 2 в седиментационные колонны).

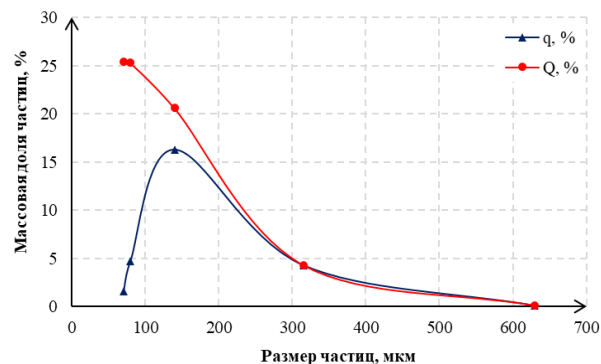


Рис. 7. Дисперсный состав угольной массы из ВУТ с ПЖ и с кавитационной обработкой (топливная смесь №2).

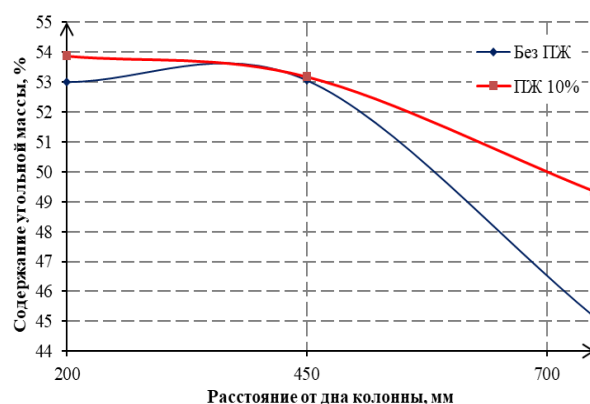


Рис. 8. Дисперсный состав угольной массы из ВУТ с ПЖ и с кавитационной обработкой (топливная смесь №2).

Установлено, что наличие ПЖ в топливной смеси приводит к замедлению осаждения угольной массы. Такой результат согласуется с тем фактом, что и вязкость суспензии, взятой в нижней части колонны также увеличивается.

Проведенные экспериментальные исследования влияния ПЖ в составе водоугольных топлив и кавитационной обработки ВУТ, в том числе и двухкомпонентного, позволяют сделать вывод о том, что несмотря на увеличение вязкости топливных смесей при добавлении третьей компоненты – ПЖ использование таких топлив в промышленной энергетике может быть достаточно эффективным. Седиментационные свойства таких топлив позволяют их хранить или транспортировать достаточно длительное время. Такое качество исследовавшихся топливных смесей делает их конкурентноспособными в сравнении с обычными двухкомпонентными водоугольными топливами, приготовленными традиционными способами, например, в емкостях с лопастными или шаровыми смесителями. Также,

следует отметить, что введение в состав ВУТ обладающей калорийностью ПЖ вносит дополнительный положительный эффект в увеличение теплотворной способности водоугольного топлива.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования влияние пирогенетической жидкости в составе водоугольных топлив на основе бурого угля и их кавитационной обработки на свойства – вязкость, стабильность, гранулометрический состав. Обоснована эффективность использования таких топлив в промышленной энергетике. Экспериментально установлено, что с точки зрения текучести водоугольного топлива на основе бурого угля допустимое количество пирогенетической жидкости в ее составе не должно превышать 10% по массе. Введение в состав водоугольного топлива 10% по массе пирогенетической жидкости приводит к увеличению вязкости на 29% не смотря на уменьшение количества угля. Снижению вязкости такого топлива способствует его кавитационная обработка. При этом увеличение времени такой обработки с 30 с до 60 с позволяет снизить вязкость топлива для двухкомпонентного водоугольного топлива на 6% и на 7% для топлива в составе с пирогенетической жидкостью. Кавитационная обработка исследовавшихся топливных смесей обеспечивает хорошую стабильность топлива на протяжении длительного времени. При этом дисперсный состав твердой компоненты исследовавшихся водоугольных топлив увеличивается как при добавлении пирогенетической жидкости к водоугольному топливу, так и без нее. Введение в состав водоугольного топлива пирогенетической жидкости приводит к замедлению осаждения угольной массы. Такой результат согласуется с тем фактом, что и вязкость суспензии, взятой в нижней части колонны также увеличивается. Кавитационная обработка водоугольных топлив и добавка в их состав пирогенетической жидкости в количестве не более 10% по массе в совокупности обеспечивают положительные характеристики таких перспективных для промышленной энергетике топлив.

Эта работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 23-29-00142.

Список литературы

1. Баранова, М. П. Сжигание водоугольных суспензионных топлив из низкометаморфизованных

- углей / М. П. Баранова, Т. А. Кулагина, С. В. Лебедев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 24-26.
2. Zhang C. On electricity consumption and economic growth in China / K. Zhou, S. Yang, Z. Shao // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 76. – P. 353-368.
3. Glushkov D. Switching coal-fired thermal power plant to composite fuel for recovering industrial and municipal waste: Combustion characteristics, emissions, and economic effect / G. Kuznetsov, K. Paushkina // Energies. – 2020. – Vol. 13 (1). – P. 259.
4. Калинихин О. Н. Природоохранные аспекты внедрения технологии сжигания водоугольного топлива / О. Н. Калинихин // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2019. – № 5(139). – С. 84-89.
5. Xie J. Arsenic and selenium distribution and speciation in coal and coal combustion by-products from coal-fired power plants / X.-D. Niu, K.-Q. He, M.-D. Shi, S.-J. Yu, C.-G. Yuan, J.-F. Liu // Fuel. – 2021. – Vol. 292. – 120228.
6. Das D. Green strategies in formulating, stabilizing and pipeline transportation of coal water slurry in the framework of WATER-ENERGY NEXUS: A state of the art review / S. K. Das, P. K. Parhi, A. K. Dan, S. Mishra, P. K. Misra // Energy Nexus. – 2021. – Vol. 4. – 100025.
7. Shadrin E.Yu. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner / I.S. Anufriev, E.B. Butakov, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, O.V. Sharypov // Fuel. – 2021. – Vol. 303. – 121182.
8. Олейникова М.И. Получение водоугольного топлива из шламов углеобогащения. Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2020. № 1. С. 132-144.
9. Alekseenko S.V. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NO_x emissions / A.A. Dekterev, L.I. Maltsev, V.A. Kuznetsov // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – Vol. 169. – P. 313-327.
10. Гвоздяков Д.В. К вопросу об исследовании структуры потока водоугольного топлива в процессе его пневмомеханического распыла / А.В. Зенков, В.Е. Губин, М.В. Ведяшкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 5-12.
11. Loureiro L.M.E.F. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels / P.B.F. Gil, F.V. Vieira de Campos, L.J.R. Nunes, J.M.F. Ferreira // Journal of the Energy Institute. – 2018. – Vol. 91 (6). – P. 978-983.
12. Gvozdyakov D.V. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liq-

uid pyrolysis products of wood waste / A.V. Zenkov, A. Zh. Kaltaev // *Energy*. – 2022. – Vol. 257. – 124813.

References

1. Baranova M. P. Burning of water-coal suspension fuels from low-metamorphosed coals / M. P. Baranova, T. A. Kulagina, S. V. Lebedev // *Chemical and oil and gas machine-building*. – 2009. – No. 9. – pp. 24-26.
2. Zhang C. On electricity consumption and economic growth in China / K. Zhou, S. Yang, Z. Shao // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 76. – P. 353-368.
3. Glushkov D. Switching coal-fired thermal power plant to composite fuel for recovering industrial and municipal waste: Combustion characteristics, emissions, and economic effect / G. Kuznetsov, K. Paushkina // *Energies*. – 2020. – Vol. 13 (1). – P. 259.
4. Kalinikhin, O. N. Environmental aspects of the implementation of coal-water fuel combustion technology / O. N. Kalinikhin // *Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. – 2019. – № 5(139). – Pp. 84-89.
5. Xie J. Arsenic and selenium distribution and speciation in coal and coal combustion by-products from coal-fired power plants / X.-D. Niu, K.-Q. He, M.-D. Shi, S.-J. Yu, C.-G. Yuan, J.-F. Liu // *Fuel*. – 2021. – Vol. 292. – 120228.
6. Das D. Green strategies in formulating, stabilizing and pipeline transportation of coal water slurry in the framework of WATER-ENERGY NEXUS: A state of the art review / S. K. Das, P. K. Parhi, A. K. Dan, S. Mishra, P. K. Misra // *Energy Nexus*. – 2021. – Vol. 4. – 100025.
7. Shadrin E.Yu. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner / I.S. Anufriev, E.B. Butakov, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, O.V. Sharypov // *Fuel*. – 2021. – Vol. 303. – 121182.
8. Oleinikova M.I. Obtaining coal-water heating from coal-enrichment sludge. Environmental protection and conservation. 2020. No. 1. pp. 132-144.
9. Alekseenko S.V. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions / A.A. Dekterev, L.I. Maltsev, V.A. Kuznetsov // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2023. – Vol. 169. – P. 313-327.
10. Gvozdyakov D.V. On the issue of studying the structure of the flow of coal-water fuel in the process of its pneumomechanical spraying / A.V. Zenkov, V.E. Gubin, M.V. Vedyashkin // *Bulletin of the South Ural State University. Family: Energy*. – 2018. – Vol. 18. – No. 4. – pp. 5-12.
11. Loureiro L.M.E.F. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels / P.B.F. Gil, F.V. Vieira de Campos, L.J.R. Nunes, J.M.F. Ferreira // *Journal of the Energy Institute*. – 2018. – Vol. 91 (6). – P. 978-983.
12. Gvozdyakov D.V. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste / A.V. Zenkov, A. Zh. Kaltaev // *Energy*. – 2022. – Vol. 257. – 124813.

УДК 504.062.2

Оценка экологической эффективности ресурсосберегающих проектов топливно-энергетического комплекса

Д.А. Козыр¹, В.Е. Губин¹, С.А. Янковский²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, ¹DAKozyr@sevsu.ru, ¹VEGubin@sevsu.ru²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия, ²jankovsky@tpu.ru

Статья поступила 18.09.2023 г.; после доработки 20.09.2023 г.

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме оценки экологической эффективности проектов топливно-энергетического комплекса. Проведен анализ нормативных и правовых актов в сфере охраны окружающей среды при внедрении ресурсосберегающих проектов. Выполнен анализ нормативно-методического обеспечения оценки воздействия на атмосферу, водные ресурсы, а также при обращении с отходами в проектах внедрения местных видов энергоресурсов (возобновляемые источники энергии, промышленные отходы, вторичные энергоресурсы). Рассмотрена возможность оценки экологического риска, предотвращённого ущерба и платы за негативное воздействие при внедрении ресурсосберегающих проектов.

Ключевые слова: ресурсосбережение, экологическая эффективность, загрязняющие вещества, атмосфера, отходы, экологический риск.

Assessment of the environmental efficiency of resource-saving fuel and energy complex projects

D.A. Kozyr¹, V.E. Gubin¹, S.A. Jankovsky²¹Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ¹DAKozyr@sevsu.ru, ¹VEGubin@sevsu.ru²National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Ave., 30, Tomsk, 634050, Russia, ²jankovsky@tpu.ru

Received 18.09.2023 y.; received in final form 20.09.2023 y.

Abstract

The article is devoted to the current problem of assessing the environmental efficiency of projects in the fuel and energy complex. An analysis of regulatory and legal acts in the field of environmental protection during the implementation of resource-saving projects was carried out. An assessment was made of the regulatory and methodological support for assessing the impact on the atmosphere, water resources, as well as waste management in projects for the introduction of local types of energy resources (renewable energy sources, industrial waste, secondary energy resources). The possibility of assessing environmental risk, prevented damage and payment for negative impacts when implementing resource-saving projects is considered.

Keywords: resource saving, environmental efficiency, pollutants, atmosphere, waste, environmental risk.

Введение

В условиях реализации четвёртого энергетического перехода, закреплённого в Энергети-

ческой стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, предусматривается отказ от использования ископаемого топлива и замена его возобновляемыми и низкоуглеродными ис-

точниками энергии [1]. Важным техническим содержанием четвёртого энергетического перехода выступают пятый и шестой технологические уклады.

Они основаны на достижениях микроэлектроники, информационных технологий, развитии нано- и биотехнологий, наноэнергетики [2].

Появление новых технологий позволяет обеспечить прогресс в создании эффективных возобновляемых источников энергии и дает возможность резко снизить энергоёмкость и материалоёмкость производства, сократить выбросы парниковых газов и других загрязняющих веществ, т.е. обеспечить низкоуглеродное развитие экономики [3].

При шестом технологическом укладе большое развитие получают технологии повышения энергоэффективности всех без исключения отраслей экономики, а также технологии производства материалов и конструкций замкнутого цикла с высокой степенью переработки вторичного сырья, т.е. «зеленые» технологии рассматриваются как один из ключевых факторов шестого технологического уклада.

Ресурсосберегающие проекты топливно-энергетического комплекса являются ключевыми при реализации четвёртого энергетического перехода. Разработка проектов, направленных на повышение экологической безопасности, в том числе проектов внедрения возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом секторе промышленности проводится с учетом их энергетической и экономической эффективности.

При оценке эффективности ресурсосберегающих проектов топливно-энергетического комплекса необходимы не только экономические и энергетические показатели, но и оценка эффективности с учетом действующего природоохранного законодательства.

В соответствии ГОСТ Р ИСО 14031-2016 «Экологический менеджмент. Оценка экологической эффективности. Руководство по оценке экологической эффективности» оценка экологической эффективности - это постоянный процесс сбора и оценки данных и информации для обеспечения текущей оценки эффективности и тенденций ее изменения со временем [4]. Для оценки экологической эффективности используются показатели, связанные с экологическими, социальными и экономическими аспектами устойчивого развития.

Различные методы оценки экологической эффективности применялись исследователями

для анализа деятельности организаций, природоохранных проектов.

Для учета как экологически, так и экономически эффективных технологий очистки дымовых газов от загрязняющих веществ разработан физико-энергетический подход, учитывающий характеристики дисперсных систем, процесса очистки, математическое описание экологической эффективности и энергетической экономичности [5, 6].

Разработана методика оценки результативности экологической деятельности коммерческой организации, которая основана на использовании данных контент-анализа ее годового отчета. Основными параметрами экологической деятельности коммерческих организаций являются: используемое сырье и материалы, энергия, водные ресурсы, биоразнообразие, загрязнение атмосферы, продукция и услуги, соответствие требованиям экологического законодательства, используемый транспорт, экологическая оценка поставщиков [7].

Постановка задачи

Оценка экологической эффективности ресурсосберегающих проектов возможна в рамках проведения государственной экологической экспертизы. В соответствии с Федеральным законом «Об экологической экспертизе» от 23.11.1995 № 174-ФЗ определены объекты государственной экологической экспертизы. Экологическая экспертиза охватывает влияние объекта на атмосферный воздух, гидросферу, литосферу, растительный и животный мир.

Ресурсосберегающие проекты топливно-энергетического сектора могут не являться объектами экологической экспертизы, соответственно оценка экологической эффективности проекта может быть не учтена при оценке их эффективности и целесообразности.

Ресурсосберегающие проекты являются природоохранными и при анализе их эффективности необходима оценка с учетом природоохранного законодательства, ущерба, экологического риска. Оценка экологической эффективности проектов топливно-энергетического комплекса может быть проведена по ряду критериев: анализ выбросов парниковых газов; эффективность использования ресурсов; использование малоотходных технологий; эффективные системы экологического мониторинга; соответствие экологическим стандартам и нормам.

Задачей исследования является анализ пока-

зателей оценки уровня экологической безопасности ресурсосберегающих проектов топливно-энергетического комплекса.

Основная часть

Проекты внедрения местных видов энергоресурсов (возобновляемых источников энергии, промышленных отходов, вторичных энергоресурсов) являются природоохранными проектами, так как полностью или частично заменяют традиционные источники энергии и предотвращают загрязнение окружающей среды.

Как любой проект, документация на внедрение местных возобновляемых энергоресурсов, должна содержать оценку воздействия на окружающую среду (ОВОС) и мероприятия по охране окружающей среды.

ОВОС основана на инженерно-экологических изысканиях и ряде нормативных и правовых актов РФ. Оценка экологического эффекта проекта внедрения местных видов энергоресурсов состоит из оценки существующего положения на объекте исследования, а также состояния атмосферного воздуха, водных ресурсов и обращения с отходами после внедрения природоохранных мероприятий. Прогнозируемое состояние окружающей среды рассчитывается на основе действующих методик и программных продуктов их реализующих.

При составлении проектной документации одним из разделов является раздел - мероприятия по охране окружающей среды.

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 16 февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» Раздел 8 «Мероприятия по охране окружающей среды» содержит [8]:

- a) результаты оценки воздействия объекта капитального строительства на окружающую среду, в том числе результаты расчетов уровня шумового воздействия на территорию, непосредственно прилегающую к жилой застройке;
- b) перечень мероприятий по предотвращению и снижению возможного негативного воздействия намечаемой хозяйственной деятельности на окружающую среду и рациональному использованию природных ресурсов на период строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации объекта капитального строительства, включающий:
 - результаты расчетов приземных концентраций загрязняющих веществ, анализ и пред-

ложения по предельно допустимым и временно согласованным выбросам;

- обоснование решений по очистке сточных вод и утилизации обезвреженных элементов, по предотвращению аварийных сбросов сточных вод; мероприятия по охране атмосферного воздуха; мероприятия по оборотному водоснабжению для объектов производственного назначения;
- мероприятия по охране и рациональному использованию земельных ресурсов и почвенного покрова, в том числе мероприятия по рекультивации нарушенных или загрязненных земельных участков и почвенного покрова; мероприятия по сбору, накоплению, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов производства и потребления;
- мероприятия по охране недр для объектов производственного назначения;
- мероприятия по охране объектов растительного и животного мира и среды их обитания;
- мероприятия по минимизации возникновения возможных аварийных ситуаций на объекте капитального строительства и последствий их воздействия на экосистему региона;
- мероприятия, технические решения и сооружения, обеспечивающие рациональное использование и охрану водных объектов, а также сохранение водных биологических ресурсов;
- программу производственного экологического контроля (мониторинга) за характером изменения всех компонентов экосистемы при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте и эксплуатации объекта, а также при авариях.

В соответствии с приказом № 999 от 1.12.2020 «Об утверждении требований к материалам оценки воздействия на окружающую среду» материалы оценки воздействия на окружающую среду включают в себя комплект документации, подготовленной при проведении оценки воздействия на окружающую среду планируемой хозяйственной и иной деятельности [9].

В материалах оценки воздействия на окружающую среду обеспечивается выявление характера, интенсивности и степени возможного воздействия на окружающую среду планируемой хозяйственной и иной деятельности, анализ и учет такого воздействия, оценка экологических

и связанных с ними социальных и экономических последствий реализации такой деятельности и разработка мер по предотвращению и (или) уменьшению таких воздействий с учетом общественного мнения.

Проводятся исследования окружающей среды, которая может быть затронута планируемой хозяйственной и иной деятельностью в результате ее реализации (по альтернативным вариантам) (физико-географические, природно-климатические, геологические и гидрогеологические, гидрографические, почвенные условия, характеристика растительного и животного мира, качество окружающей среды, в том числе атмосферного воздуха, водных объектов, почв), включая социально-экономическую ситуацию района реализации планируемой хозяйственной и иной деятельности.

Выполняется оценка воздействия на окружающую среду (атмосферный воздух, поверхностные водные объекты, геологическую среду и подземные воды, почвы, растительный и животный мир, воздействие отходов производства и потребления на состояние окружающей среды, оценка физических факторов воздействия, описание возможных аварийных ситуаций и оценка воздействия на окружающую среду при аварийных ситуациях) планируемой хозяйственной и иной деятельности по рассмотренным альтернативным вариантам ее реализации, в том числе оценка достоверности прогнозируемых последствий планируемой хозяйственной и иной деятельности.

Инженерно-экологические изыскания, необходимые при проектировании природоохранных мероприятий выполняются в соответствии с нормативными документами: СП 47.13330.2012 «Инженерные изыскания для строительства», СП 11-102-97 «Инженерно-экологические изыскания для строительства» [10].

Инженерно-экологические исследования предваряют экологическое проектирование и используются в качестве базовой информации для него. В состав инженерно-экологических изысканий для строительства объектов капитального строительства входят анализ опубликованных материалов о состоянии природной среды, маршрутные наблюдения, гидрологические, почвенные, биологические, санитарно-эпидемиологические и медико-биологические исследования, оценка социально-экономических условий территории изысканий, оценка вредных физических воздействий; лабораторные химико-

аналитические исследования.

Оценка воздействия на атмосферу при внедрении ресурсосберегающих проектов проводится на основе:

- характеристики уровня загрязнения атмосферного воздуха в районе работ;
- воздействия объекта на атмосферный воздух и характеристики источников выброса загрязняющих веществ;
- расчета приземных концентраций загрязняющих веществ от источников выбросов объекта;
- мероприятий по регулированию выбросов загрязняющих веществ при неблагоприятных метеорологических условиях.

С учетом характеристик источников выбросов, расхода топлива и сырья выполняется расчет выбросов источников загрязнения атмосферы по действующим методикам.

Оценка выбросов парниковых газов проводится в соответствии с Приказом Минприроды России от 27.05.2022 N 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» [10].

Одним из критериев оценки экологической эффективности проектов является оценка санитарно-защитной зоны объекта. При внедрении ресурсосберегающих проектов сравнивается изменение санитарно-защитной зоны.

Оценка санитарно-защитной зоны исследования проводится в соответствии с:

- Постановление Правительства РФ от 3 марта 2018 г. N 222 "Об утверждении Правил установления санитарно-защитных зон и использования земельных участков, расположенных в границах санитарно-защитных зон" [11].
- СанПиН 2.1.3684-21 "Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий" [12].
- СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов [13].
- МР 2.1.0246-21. 2.1. Коммунальная гигиена.

Методические рекомендации по обеспечению санитарно-эпидемиологических требований к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. Методические рекомендации.

Оценка воздействия на водные ресурсы содержит комплекс предложений по рациональному использованию водных ресурсов при осуществлении намечаемой деятельности и технических решений по предупреждению негативного воздействия от проведения работ на подземные и поверхностные воды.

Работа топливно-энергетического комплекса связана с образованием отходов. Расчет количественных показателей образования отходов проводится по соответствующим методикам.

Обращение с отходами при внедрении ресурсосберегающих проектов топливно-энергетического комплекса регулируется:

- Приказ Минприроды России от 07.12.2020 № 1021 «Об утверждении Методических указаний по разработке проектов нормативов образования отходов и лимитов на их размещение» [14].
- Приказ Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 22.05.2017 № 242 «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов» (Зарегистрирован в Минюсте России 08.06.2017 № 47008). ФККО-2017 [15].
- Постановление правительства РФ от 16.08.2013. № 712 «О порядке проведения паспортизации отходов I-IV классов опасности» [16].

Обязательный компонент оценки экологической эффективности - применение экологических рисков. Использование экологических рисков позволяет получить обобщенный результат влияния пороговых загрязнителей, канцерогенных и радиоактивных веществ на здоровье человека и окружающую среду. Расчет экологических рисков проводится в соответствии с:

- Р 2.1.10.1920-04. «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» [17].
- ГОСТ Р 58771 — 2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» [18].

Одним из основных показателей при оценке

экологической эффективности является расчет платы за ущерб окружающей среде. Это ключевой показатель при оценке эколого-экономической оценке ресурсосберегающего проекта топливно-энергетического комплекса.

Расчет платы за выбросы в атмосферу, сбросы в водные объекты, образование отходов выполняется в соответствии с постановлением Правительства РФ от 13.09.2016 №913 (ред. от 24.01.2020) «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» [19].

Расчет ущерба за сброс загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты выполняется в соответствии с приказом № 87 от 13.04.2009 г «Об утверждении методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства». Расчет ущерба за загрязнение почв выполняется в соответствии с приказом Минприроды России от 08.07.2010 N 238 (ред. от 18.11.2021) «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды» [20, 21].

Заключение

Ресурсосберегающие проекты топливно-энергетического комплекса являются ключевыми при переходе к четвертому энергетическому переходу. Для оценки их эффективности необходим сравнительный анализ воздействия на окружающую среду.

Анализ нормативного и правового обеспечения оценки экологической эффективности позволил выявить основные показатели оценки уровня экологической безопасности ресурсосберегающих проектов топливно-энергетического комплекса:

- оценка воздействия на атмосферу, водные ресурсы, а также при обращении с отходами в соответствии с методологией подготовки материалов оценки воздействия на окружающую среду;
- анализ выбросов парниковых газов;
- анализ системы экологического мониторинга;
- оценка экологического риска и санитарно-защитной зоны;
- эколого-экономическая оценка предотвращенного ущерба и плата за негативное воздействие при внедрении ресурсосберегающих проектов.

Использование данных показателей при оценке экологической эффективности проектов

топливно-энергетического комплекса повысит уровень их экологической и энергетической безопасности.

Эта работа была выполнена в рамках проекта ТПУ ПИШ-НИР-2023-011.

Список литературы

- Еремин В. В. Четвертый энергетический переход — барьеры и пути преодоления // Экономика. Налоги. Право. 2023. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chetvertyy-energeticheskiy-perehod-bariery-i-puti-preodoleniya>.
- Вдовина А.А. Понятие «технологический уклад» в системе экономических категорий и новотехнологические уклады общественного развития // Креативная экономика. – 2019. – Том 13. – № 4. – С. 605-618. doi:10.18334/ce.13.4.40522
- Волошин В.И., Назарова О.Е. Низкоуглеродное развитие энергетики: угрозы для России и возможности их преодоления // Российский внешнеэкономический вестник. 2022. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nizkouglerodnoe-razvitiye-energetiki-ugrozy-dlya-rossii-i-vozmozhnosti-ih-preodoleniya>.
- Беспалов В.И., Гурова О.С., Парамонова О.Н., Лысова Е.П. Разработка научно обоснованной методики оценки и выбора максимально экологически эффективных и энергетически экономичных технологий очистки от токсичных компонентов отходящих и выхлопных газов объектов городской среды // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №6 (2015). DOI: 10.15862/149TVN615
- Лысова Е. П. Выбор критериев оценки эффективности мероприятий по обеспечению экологической безопасности предприятий топливно-энергетического комплекса // ИВД. 2013. №3 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-kriteriev-otsenki-effektivnosti-meropriyatiy-po-obespecheniyu-ekologicheskoy-bezopasnosti-predpriyatiy-toplivno>.
- ГОСТ Р ИСО 14031-2016 «Экологический менеджмент. Оценка экологической эффективности. Руководство по оценке экологической эффективности»
- Белогина Н.С., Майорова А.Н., Майорова Е.А. Оценка результативности экологической деятельности коммерческих организаций // Российское предпринимательство. – 2018. – Том 19. – № 1. – С. 181-194. doi: 10.18334/rp.19.1.38636
- О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию: постановлением Правительства РФ от 16 февраля 2008 г. № 87 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008. – № 8. – Ст. 744.
- Об утверждении требований к материалам оценки воздействия на окружающую среду: приказом № 999 от 1.12.2020 // официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) от 21.4.2021 г., ст. 0001202104210002
- Инженерно-экологические изыскания для строительства: СП 11-102-97. – М.: Госстрой РФ, 1997.
- Об утверждении Правил установления санитарно-защитных зон и использования земельных участков, расположенных в границах санитарно-защитных зон: Постановление Правительства РФ от 3 марта 2018 г. N 222 // Официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) от 7.03.2018 г., ст. 0001201803070039
- Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 2.1.3684-21 "Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий: Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 3 // официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) от 05.02.2021, ст. 0001202102050027
- СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов
- Об утверждении Методических указаний по разработке проектов нормативов образования отходов и лимитов на их размещение: приказ Минприроды России от 07.12.2020 № 1021 // официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) от 28.12.2020, ст. 0001202012280007
- Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов: приказ Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 22.05.2017 № 242 // официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) от 13.06.2017, ст. 0001201706130004
- О порядке проведения паспортизации отходов I-IV классов опасности: постановление правительства РФ от 16.08.2013. № 712 // официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) от 20.08.2013, ст. 0001201308200002
- Р 2.1.10.1920-04. «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду». Москва. – 2004. – 124 с.
- ГОСТ Р 58771 — 2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска».

19. О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах: постановление Правительства РФ от 13.09.2016 №913 (ред. от 24.01.2020) // официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) от 15.09.2016, ст. 0001201609150007.
20. О порядке утверждения методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства // официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) от 04.11.2006, ст. 4791.
21. Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды // официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) от 07.10.2010, ст. 40.

References

1. Eremin V.V. The fourth energy transition - barriers and ways to overcome // Economics. Taxes. Right. 2023. No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chetvertyy-energeticheskiy-perehod-bariery-i-puti-preodoleniya>.
2. Vdovina A.A. The concept of "technological structure" in the system of economic categories and new technological structures of social development // Creative Economy. – 2019. – Volume 13. – No. 4. – P. 605-618. doi: 10.18334/ce.13.4.40522
3. Voloshin V.I., Nazarova O.E. Low-carbon energy development: threats to Russia and opportunities to overcome them // Russian Foreign Economic Bulletin. 2022. No. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nizkouglerodnoe-razvitiye-energetiki-ugrozhdlya-rossii-i-vozmozhnosti-ih-preodoleniya>.
4. Bupalov V.I., Gurova O.S., Paramonova O.N., Lysova E.P. Development of a scientifically based methodology for assessing and selecting the most environmentally efficient and energy-saving technologies for purifying toxic components of waste and exhaust gases from urban environment objects // Internet journal "SCIENCE" Vol. 7, No. 6 (2015). DOI: 10.15862/149TVN615
5. Lysova E. P. Selection of criteria for assessing the effectiveness of measures to ensure environmental safety of enterprises of the fuel and energy complex // IVD. 2013. No. 3 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-kriteriev-otsenki-effektivnosti-meropriyatiy-po-obespecheniyu-ekologicheskoy-bezopasnosti-predpriyatiy-toplivno>.
6. GOST R ISO 14031-2016 "Environmental management. Assessment of environmental efficiency. Guidelines for assessing environmental performance"
7. Belogina N.S., Mayorova A.N., Mayorova E.A. Assessing the effectiveness of environmental activities of commercial organizations // Russian Entrepreneurship. – 2018. – Volume 19. – No. 1. – P. 181-194. doi: 10.18334/rp.19.1.38636
8. On the composition of sections of project documentation and requirements for their content: Decree of the Government of the Russian Federation of February 16, 2008 No. 87 // Collection of legislation of the Russian Federation. – 2008. – No. 8. – Art. 744.
9. On approval of requirements for environmental impact assessment materials: by order No. 999 dated December 1, 2020 // official Internet portal of legal information (www.pravo.gov.ru) dated April 21, 2021, art. 0001202104210002
10. Engineering and environmental surveys for construction: SP 11-102-97. – M.: Gosstroy RF, 1997.
11. On approval of the Rules for the establishment of sanitary protection zones and the use of land plots located within the boundaries of sanitary protection zones: Decree of the Government of the Russian Federation of March 3, 2018 N 222 // official Internet portal of legal information (www.pravo.gov.ru) dated March 7, 2018, Art. 0001201803070039
12. On approval of sanitary rules and norms SanPiN 2.1.3684-21 "Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soil, residential premises, operation of production water, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures: Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021 No. 3 // official Internet portal of legal information (www.pravo.gov.ru) from 02/05/2021, article 0001202102050027
13. SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03 Sanitary protection zones and sanitary classification of enterprises, structures and other objects
14. On approval of Methodological guidelines for the development of draft standards for waste generation and limits on their disposal: Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 7, 2020 No. 1021 // official Internet portal of legal information (www.pravo.gov.ru) dated December 28, 2020, art. 0001202012280007
15. On approval of the Federal Classification Catalog of waste: order of the Federal Service for Supervision in the Sphere of Natural Resources dated May 22, 2017 No. 242 // official Internet portal of legal information (www.pravo.gov.ru) dated 13.06.2017, Art. 0001201706130004
16. On the procedure for certification of waste of I-IV hazard classes: Decree of the Government of the Russian Federation dated August 16, 2013. No. 712 // official Internet portal of legal information (www.pravo.gov.ru) dated 08/20/2013, art. 0001201308200002
17. R 2.1.10.1920-04. "Guidelines for assessing the risk to public health from exposure to chemicals that pollute the environment." Moscow. – 2004. – 124 p.

18. GOSTR 58771 - 2019 "Risk management. Risk assessment technologies".
19. On payment rates for negative impact on the environment and additional coefficients: Decree of the Government of the Russian Federation dated September 13, 2016 No. 913 (as amended on January 24, 2020) // official Internet portal of legal information (www.pravo.gov.ru) dated September 15, 2016, art. 0001201609150007.
20. On the procedure for approving the methodology for calculating the amount of damage caused to water bodies as a result of violation of water legislation // official Internet portal of legal information (www.pravo.gov.ru) dated November 4, 2006, Art. 4791.
21. On approval of the Methodology for calculating the amount of damage caused to soils as an object of environmental protection // official Internet portal of legal information (www.pravo.gov.ru) dated 10/07/2010, Art. 40.

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

Журнал входит в национальную библиографическую базу данных РИНЦ.

В журнале публикуются результаты исследований по следующим направлениям:

- тепловые и ядерные энергетические установки;
- электротехнические комплексы и сети;
- нетрадиционные и возобновляемые источники энергии;
- 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.

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 (заголовки статьи, фамилия, имя и отчество (полностью), должность, ученая степень, полный почтовый адрес, контактные телефоны и адреса электронной почты);
- компакт-диск с текстовым файлом.

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ

При подготовке статьи в журнал авторы должны руководствоваться стандартом «Оригиналы авторские и текстовые издательские» (ОСТ 29.115—88). К авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования.

Статья должна содержать:

- шифр УДК; название статьи; инициалы и фамилии авторов;
- место работы каждого автора с полным почтовым адресом;
- аннотацию на русском языке (4-5 строк), отображающую цель проведенных исследований и основные результаты;
- ключевые слова;
- индекс UDC (УДК для англ. блока);
- заглавие (на английском языке);
- фамилии и инициалы авторов (на английском языке);

- место работы каждого автора с полным почтовым адресом (на английском);
- аннотация на английском языке с заголовком «Abstract»;
- ключевые слова (на английском языке, соответствующие русскоязычному набору);
- статья на языке оригинала;
- список литературных источников на русском языке (6-20 ссылок);
- список литературных источников на латинице: тот же список, что и в статье, но с транслитерацией фамилий и слов, записанных по-русски, и с переводом на английский язык неанглоязычных названий источников).

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 № 3, 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 21.09.2023. Заказ 32/23. Дата выхода в свет: 11.10.2023. Тираж 65 экз. Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 11,16.

Севастополь, 2023