

ISSN 1999-494X (Print)  
ISSN 2313-6057 (Online)

**Журнал Сибирского  
федерального университета  
Техника и технологии**

**Journal of Siberian  
Federal University  
Engineering & Technologies**

**2020 13 (6)**

ISSN 1999-494X (Print)  
ISSN 2313-6057 (Online)

2020 13(6)

Журнал включен в «Russian Science Citation Index» на платформе «Web of Science»

Индексируется Российским индексом научного цитирования (НЭБ), представлен в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, EBSCO (США), Google Scholar, ProQuest, Erihplus, READera, КиберЛенинке.

Включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» Высшей аттестационной комиссии.

# Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

---

## Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

---

**Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.  
Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: *В.А.Кулагин*. Редактор *И.А.Вейсиг*. Корректор *С.В.Хазаржан*.  
Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 6. 30.09.2020. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издательства: 660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, оф. 32-03.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ  
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28722 от 29.06.2007 г.,  
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,  
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 14.09.2020. Формат 84х108/16. Усл. печ. л. 9,7.

Уч.-изд. л. 9,2. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 11415.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

## CHIEF EDITOR

Vladimir A. Kulagin, Head of the Department of Heat Technology and Fluid Dynamics of Polytechnic Institute of SibFU, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Honorary Worker of Science and Technology of the Russia

---

## EDITORIAL BOARD

- Sereeter Batmönkh, Institute of Heat Engineering and Industrial Ecology Mongolian Academy of Sciences, Mongolia;
- Yuri Galerkin, Saint Petersburg State Polytechnic University, Russia;
- Eugene Garin, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Zuev, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Tomsk, Russia;
- Juriy Koziratzky, Military Education and Research Centre of Military-Air Forces "Military-Air Academy name after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russia;
- Genius Kuznetsov, Tomsk Polytechnic University, Russia;
- Feng-Chen Li, Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology Sun Yat-Sen University, Zhuhai, China;
- Dmitriy Markovich, Institute of Thermophysics Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia;
- Valery Mironov, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Moskvichev, Institute of Computational Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia;
- Bernard Nacke, Institute of Electrotechnology Leibniz University, Hannover, Germany;
- Valeriy Nikulin, Kamsk Institute of Humanitarian and Engineering Technologies, Izhevsk, Russia;
- Valery Okulov, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark;
- Oleg Ostrovski, University of New South Wales, Australia;
- Harald Oye, Norwegian University of Science and Technology, Norway;
- Vasili Panteleev, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Petr Polyakov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Ibragim Khisameev, Kazan State Technological University, Russia;
- Nikolai Zuglenok, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Shaidurov, Institute of Computational Modelling Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Russia;
- Anatoly Shvidenko, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria.

## CONTENTS

<b>Vasiliy I. Murko, Vladimir I. Fedyaev, Viktor I. Karpenok, Andrey E. Shanshin and Amir T. Mukhtarov</b> On the Possibility of Using Fine Coal Waste of the Processing Plant «Energeticheskaya» as a Basis for Boiler Fuel .....	<b>657</b>
<b>Evgeniy N. Vasil'ev</b> Heat Exchange Modeling in Cooling Fins.....	<b>669</b>
<b>Yuri N. Bulatov and Andrey V. Kryukov</b> Algorithms for Creating the Digital Twin of a Distributed Generator .....	<b>677</b>
<b>Dmitriy R. Bibikov, Anton K. Poley and Alexander V. Kulik</b> Exergetic Analysis of Cogeneration Energy Sources.....	<b>690</b>
<b>Vladimir A. Tremyasov, Yana E. Zograf and Tatyana V. Krivenko</b> Risk Assessment of Renewable Energy Generation Systems Projects.....	<b>702</b>
<b>Mirsoli O. Uzbekov and Azamat G. Tukhtasinov</b> Thermal Efficiency of a Solar Air-Heating Collector with a Metal Chip Absorber.....	<b>712</b>
<b>Vladimir A. Tremyasov and Vladislav G. Belov</b> The Assessment of the Operational State of Traction Power Transformers by means of Decision Tables with Fuzzy Input Parameters.....	<b>721</b>
<b>Anna Yu. Arestova, Sergey V. Mitrofanov, Anastasiya G. Rusina and Alexey A. Kolesnikov</b> Application of GIS Technologies to Improve the Efficiency of HPP Cascades Simulation Model .....	<b>732</b>
<b>Vladimir V. Moskvichev and Maksim A. Kovalev</b> Assessment of Operational Reliability Indicators of Mine Hydraulic Excavators .....	<b>745</b>
<b>Dmitry V. Emelyanov, Irina Y. Botvich, Nikita O. Malchikov and Anatoly P. Shevyrnogov</b> Temperature Dynamics Assessment of Agricultural Objects Based on Unmanned Aircraft Data.....	<b>757</b>
<b>Khalikhul Sh. Choriev</b> Performance Indicators of Vehicle Use in the Transportation Process .....	<b>766</b>



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, А.Е. Шаньшин, А.Т. Мухтаров</b> О возможности использования тонкодисперсных отходов углеобогащения ОФ «Энергетическая» в качестве основы для котельного топлива .....	<b>657</b>
<b>Е.Н. Васильев</b> Моделирование теплообмена в ребрах охлаждения .....	<b>669</b>
<b>Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков</b> Алгоритмы построения цифрового двойника установки распределенной генерации .....	<b>677</b>
<b>Д.Р. Бибииков, А.К. Полей, А.В. Кулик</b> Эксергетический анализ когенерационных энергоисточников .....	<b>690</b>
<b>В.А. Тремясов, Я.Е. Зограф, Т.В. Кривенко</b> Оценка рисков проектов систем генерации с возобновляемыми источниками энергии .....	<b>702</b>
<b>М.О. Узбеков, А.Г. Тухтасинов</b> Тепловая эффективность солнечного воздушнонагревательного коллектора с металлическим стружечным абсорбером.....	<b>712</b>
<b>В.А. Тремясов, В.Г. Белов</b> Оценка эксплуатационного состояния тяговых силовых трансформаторов с использованием таблиц решений при нечетких входных параметрах.....	<b>721</b>
<b>А.Ю. Арестова, С.В. Митрофанов, А.Г. Руси́на, А.А. Колесников</b> Применение ГИС-технологий для повышения эффективности имитационного моделирования каскадов ГЭС .....	<b>732</b>
<b>В.В. Москвичев, М.А. Ковалев</b> Оценка показателей эксплуатационной надежности карьерных гидравлических экскаваторов.....	<b>745</b>
<b>Д.В. Емельянов, И.Ю. Ботвич, Н.О. Мальчиков, А.П. Шевырногов</b> Оценка динамики температур сельскохозяйственных объектов по данным беспилотных воздушных судов.....	<b>757</b>
<b>Х.Ш. Чориев</b> Показатели эффективности использования автомобиля в процессе транспортировки .....	<b>766</b>

DOI: 10.17516/1999-494X-0254

УДК 519.87:532.525.3

## **On the Possibility of Using Fine Coal Waste of the Processing Plant «Energeticheskaya» as a Basis for Boiler Fuel**

**Vasiliy I. Murko<sup>\*a</sup>,**

**Vladimir I. Fedyaev<sup>a</sup>, Viktor I. Karpenok<sup>a</sup>,**

**Andrey E. Shanshin<sup>b</sup> and Amir T. Mukhtarov<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>LLC Scientific and Production Centre “Sibekotekhnika”*

*Novokuznetsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>JSC “Coal Company “Kuzbassrazrezugol”*

*Kemerovo, Russian Federation*

Received 12.03.2020, received in revised form 21.04.2020, accepted 21.05.2020

*Abstract.* The article presents the results of experimental tests of the preparation and combustion of CWF obtained on the basis of finely dispersed waste of coal enrichment (filter cake) of the PP «Energeticheskaya» of the branch «Kaltansky Coal Mine» of the Kuzbassrazrezugol Management Company JSC, at the KuzGTU demonstration semi-industrial stand. The tests carried out have shown that on the basis of the RP filter cake, it is possible to prepare a suspension coal-water fuel with structural-rheological and thermophysical characteristics that ensure efficient combustion of the obtained CWF. For fuel combustion, a boiler with a heating capacity of 0.63 MW with a vortex adiabatic furnace was used. The results obtained confirmed the real possibility of industrial use of the developed technology for the utilization of TDOU in the form of VUT at boiler houses, mini-thermal power plants, state district power stations and other heat-generating installations.

*Keywords:* finely dispersed waste of coal preparation, suspension water-coal fuel, vortex combustion, hazardous emissions.

Citation: Murko V.I., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Shanshin A.E., Mukhtarov A.T. On the possibility of using fine coal waste of the Processing Plant «Energeticheskaya» as a basis for boiler fuel, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 657-668. DOI: 10.17516/1999-494X-0254

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: sib\_eco@mail.ru

## **О возможности использования тонкодисперсных отходов углеобогащения ОФ «Энергетическая» в качестве основы для котельного топлива**

**В.И. Мурко<sup>а</sup>, В.И. Федяев<sup>а</sup>,  
В.И. Карпенко<sup>а</sup>, А.Е. Шаньшин<sup>б</sup>, А.Т. Мухтаров<sup>б</sup>**  
*<sup>а</sup>ООО Научно-производственный центр «Сибэкотехника»  
Российская Федерация, Новокузнецк  
<sup>б</sup>АО «Угольная Компания «Кузбассразрезуголь»  
Российская Федерация, Кемерово*

*Аннотация.* В статье приводятся результаты экспериментальных испытаний приготовления и сжигания водоугольного топлива, полученного на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения (фильтр-кека) ОФ «Энергетическая» филиала «Калтанский угольный разрез» АО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь», на демонстрационном полупромышленном стенде Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева. Проведенные испытания показали, что на основе фильтр-кека ОФ можно приготовить суспензионное водоугольное топливо со структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками, обеспечивающими эффективное сжигание полученного ВУТ. Для сжигания топлива использовался котел теплопроизводительностью 0,63 МВт с вихревой адиабатической топкой. Полученные результаты подтвердили реальную возможность промышленного использования разработанной технологии для утилизации тонкодисперсных отходов углеобогащения в виде ВУТ на котельных, мини-ТЭЦ, ГРЭС и других теплогенерирующих установках.

*Ключевые слова:* тонкодисперсные отходы углеобогащения, суспензионное водоугольное топливо, вихревое сжигание, вредные выбросы.

Цитирование: Мурко, В.И. О возможности использования тонкодисперсных отходов углеобогащения ОФ «Энергетическая» в качестве основы для котельного топлива / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, А.Е. Шаньшин, А.Т. Мухтаров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 657-668. DOI: 10.17516/1999-494X-0254

### **Состояние вопроса**

Проблема использования тонкодисперсных отходов углеобогащения (ТДОУ) стоит остро не только для современных углеобогащающих фабрик АО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь», но и для многих угольных компаний Кузбасса и России. Транспортирование на иловые площадки и последующее хранение ТДОУ требует значительных затрат, влечет прямые безвозвратные потери горючей массы и оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Наиболее эффективное решение данной проблемы видится в получении на основе данных «отходов» суспензионного водоугольного топлива (ВУТ) и его сжигании в специализированных котлах с вихревой системой сжигания. Это связано с тем, что характеристика ТДОУ (крупность частиц не более 1(3) мм (преимущественно менее 0,1 мм), влажность 35-45 % и зольность от 20 до 47 %) в наибольшей степени подходит для приготовления ВУТ с требуемыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками и наименьшими затратами. При этом приготовленное топливо стабильно при хранении и транспортировании. Использование для сжигания полученного ВУТ котлов с вихревыми топками позволяет до-

стичь наибольшей эффективности процесса горения топлива с содержанием вредных выбросов в дымовых газах при этом существенно ниже допустимых значений.

Технология получения, гидротранспортирования и сжигания водоугольного топлива (ВУТ) в промышленных масштабах была впервые в мировой практике реализована в СССР и затем России в конце 20 столетия при разработке, строительстве и эксплуатации опытно-промышленного углепровода «Белово-Новосибирск» [1]. В результате было отработано несколько технологических схем приготовления топлива из угля марок Д и Г, проведено тестирование его гидротранспорта на расстояние 262 км с последующим факельным сжиганием в котлах ТПЕ-216 Новосибирской ТЭЦ-5. На полученное топливо были разработаны временные технические условия [2, 3], в которых устанавливались значения структурно-реологических и теплофизических характеристик, которым должно удовлетворять полученное водоугольное топливо.

В последние годы предприятием «Сибэкотехника» были выполнены экспериментальные и полупромышленные и промышленные испытания по использованию технологии ВУТ для утилизации тонкодисперсных отходов углеобогащения, которые подтвердили высокую эффективность разработанных технологических и технических решений [4-8].

Из литературных источников [3], а также из материалов, полученных во время командировки группы специалистов из Кузбасса и Екатеринбурга (в состав группы входили и авторы статьи) в Китай в январе 2020 г., установлено, что технология приготовления, гидротранспортирования и использования ВУТ широко применяется в угольной и других отраслях промышленности этой страны.

Причинами использования технологии ВУТ являются:

- необходимость сокращения вредных выбросов на предприятиях в городах и прибрежной зоне;
- снижение себестоимости тепловой и электроэнергии при выработке на мазуте, дизельном топливе и газе (замена на ВУТ);
- необходимость транспортировки топлива в труднодоступные места и на предприятия, не имеющие возможности организации участка подготовки и подачи традиционного топлива.

Сотрудниками Пекинского угольного института и компанией China coal technology and Engineering Group Clean Energy Co., Ltd, совместно с профильными компаниями, разработано уже четыре поколения технологии приготовления ВУТ (технологические особенности приготовления ВУТ в Китае представлены на рис. 1 и 2).

В настоящее время ВУТ используется для сжигания в модернизированных котельных установках для выработки горячей воды и пара. Пар направляется на производство тепловой энергии, на генерацию электрической энергии в турбинный цех, а также для технологических потребителей. Помимо этого, ВУТ в качестве топлива подают на другие предприятия с помощью углепроводов (от нескольких сотен метров до 9 км) и развозят автоцистернами (плечо доставки – до 400 км).

В настоящее время в КНР на водоугольном топливе работает более 17 установок на 10 объектах (ТЭЦ и котельные). Основные объекты внедрены в 90-е и 2000-е гг.

Кроме прямого сжигания ВУТ направляют на газификацию для получения синтез-газа и последующего приготовления различных химических продуктов, а также для производства жидкого топлива. Специалистами ведется создание углепровода протяженностью 770 км про-

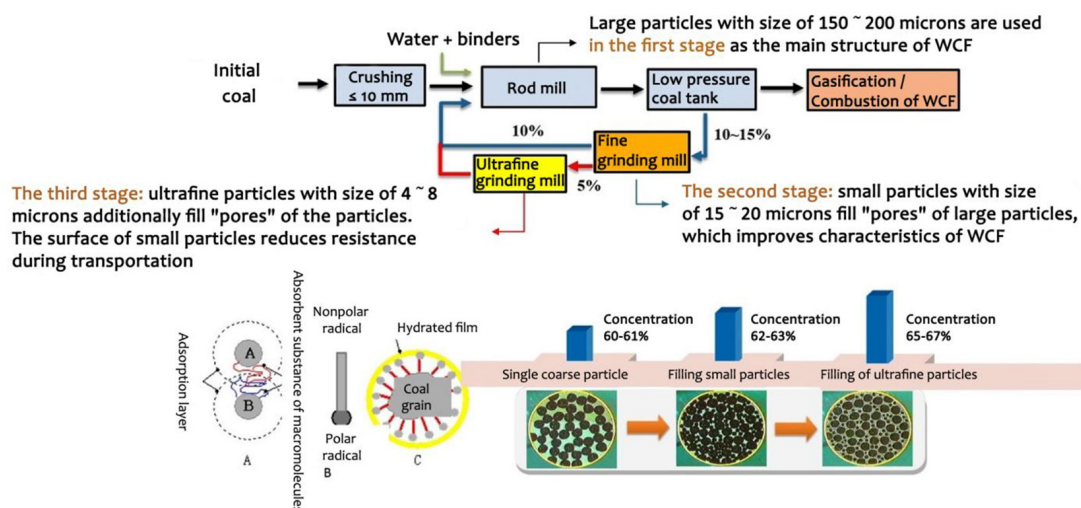


Рис. 1. Технологические особенности приготовления ВУТ в Китае

Fig. 1. Technological features of WCF preparation in China

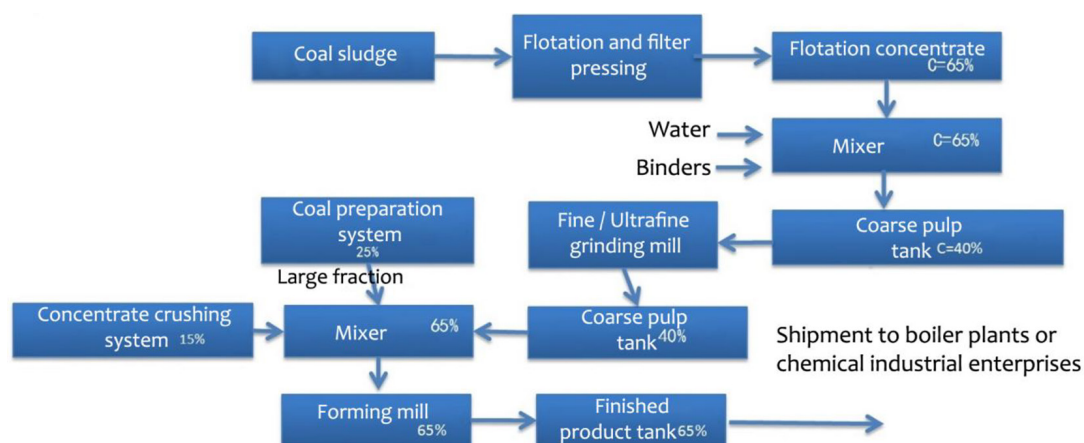


Рис. 2. Технология производства высококонцентрированного ВУТ из флотационных шламов

Fig. 2. Technology of highly concentrated WCF production from flotation sludges

изводительностью 10 млн т. Назначение ВУТ после гидротранспорта – газификация с получением химических продуктов. Строительство планируется начать в 2021 г.

На основе технологий 3-го и 4-го поколений разработана технология производства высо-  
коконтрированного ВУТ из флотационных шламов (рис. 2).

В последние годы в России технология получения и сжигания ВУТ также была усовершенствована с целью ее эффективного использования для утилизации тонкодисперсных угольных шламов (ТДОУ) [4-8]. Основными отличиями характеристик исходного сырья для приготовления водоугольного топлива из угольного шлама и угля являются: максимальная крупность частиц шлама составляет 1(3) мм по сравнению с крупностью угля до 150(300) мм, повышенная зольность (до 43-47 % для шлама), а для угля не более 17 %, и, соответственно, более низ-

кая теплота сгорания рабочего топлива (для шлама 11,5 МДж/кг) и для угля, соответственно 21,7 МДж/кг. Указанные различия, а также то, что в шламах присутствуют флокулянты и коагулянты различной природы (до 400 г/т), требуют разработки соответствующих технологических и технических решений по приготовлению и сжиганию топлива при его получении на основе ТДОУ.

В первую очередь отличия в разработанных технологических и технических решениях касаются выбора средств помола, смешивания и гомогенизации, пластифицирующей добавки, технологии и технической реализации системы сжигания. Ранее специалистами НПЦ «Сибэкотехника» совместно с учеными Кузбасского государственного технического университета был создан экспериментальный стенд для исследования технологий снижения вредных выбросов при сжигании различных угольных топлив [10, 11].

В рамках данного стенда имеется возможность проводить экспериментальные исследования по приготовлению и сжиганию ВУТ на основе угольных шламов.

### **Используемые продукты и оборудование экспериментальной стендовой установки**

Для исследований использовался угольный шлам (ТДОУ) в виде фильтр-кека (ФК) ОФ «Энергетическая» филиала «Калтанский угольный разрез» УК «Кузбассразрезуголь». В таблице 1 представлена характеристика ФК и полученного водоугольного топлива.

В процессе приготовления ВУТ на основе данного шлама использовалась пластифицирующая добавка эмульгирующего действия (ПД), состав которой и расход (0,3 % от твердой фазы в ВУТ) предварительно были подобраны в лабораторных условиях с применением вибростенда. Специалистами АО «УК «Кузбассразрезуголь» совместно с ООО НПЦ «Сибэкотехника» и Кузбасским государственным техническим университетом им. Т.Ф. Горбачева (КузГТУ) были проведены демонстрационные испытания приготовления и сжигания ВУТ на основе фильтр-кека ОФ «Энергетическая» (г. Калтан, Кемеровская область).

Для испытаний использовались ТДОУ – фильтр-кек ОФ «Энергетическая», представительная проба которого массой 1 тонна была доставлена на стенд. Характеристика фильтр-кека представлена в табл. 1.

По технологической схеме приготовления ВУТ ФК загружается в смеситель, куда одновременно с ним дозировано подается водный раствор реагента-пластификатора. После смешивания в смесителе полученная водоугольная суспензия разгружается в приемную емкость, откуда насосом дозировано подается в бикамерную шаровую вибромельницу на доизмельчение и дополнительное перемешивание. Бикамерная вибромельница (патент на полезную модель РФ № 144721) состоит из цилиндрического корпуса 1, разделенного цилиндрическими вставками 2 на внутреннюю 3 и внешнюю 4 основные концентрические полости и внешнюю дополнительную полость 5, которые гидравлически связаны между собой посредством окон 6 и спускных каналов 7. Соответствующие цилиндрические вставки выполнены таким образом, что высота сливного порога дополнительной внешней концентрической полости меньше аналогичной высоты предыдущей концентрической полости. На верхней крышке 8 корпуса установлен питающий патрубок 9. Полости заполнены измельчающей средой – измельчительными элементами (на рис. не показано). Снаружи дополнительной полости на ее внешней боковой стенке 10 за-



Таблица 1. Характеристика фильтр-кека и ВУТ, приготовленного из него

Table 1. Characteristics of filter mud and WCF prepared from it

№	Наименование параметра	Единицы измерения	Значение	
			ФК	ВУТ
1	Марка угля		Т	Т
2	Крупность частиц	мм	0-0,6	0-0,250
3	Влажность	%	29,4	40
4	Зольность	%	21,3	21,3
5	Низшая теплота сгорания	ккал/кг (МДж/кг)	4375 (18,3)	3631 (15,2)
6	Эффективная вязкость при скорости сдвига $81 \text{ с}^{-1}$	мПа×с	-	менее 500
7	Расход реагента-пластификатора	% от сухой массы ФК	-	0,3

креплены сливные желоба 11, соединенные со сливными патрубками 12. Корпус установлен на раме 13 через пружины 14. На днище корпуса закреплен вибровозбудитель 15.

Вибромельница работает следующим образом.

Исходный материал и жидкая фаза (например, вода) через питающий патрубок 9 подаются во внутреннюю концентрическую полость 3 корпуса вибромельницы, заполненную измельчающей средой. За счет воздействия вибрирующей измельчающей среды, обеспечиваемого вибровозбудителем 15, осуществляется перемешивание поступающих продуктов и предварительное мокрое измельчение частиц твердого материала. Получаемая гидросмесь через окна 6, оборудованные во вставке 2, за счет перепада высоты смеси в полостях, поступает в следующую внешнюю полость 4 корпуса. Далее через спускные каналы 7 измельченная гидросмесь поступает в дополнительную внешнюю полость 5, также заполненную измельчающей средой, под вибрационным действием которой продолжается мокрое измельчение твердых частиц. При этом движение измельчаемой среды в двух последних полостях осуществляется снизу вверх со скоростью, существенно меньшей, чем в предшествующих полостях, что обеспечивает высокую эффективность измельчения при меньших энергозатратах. Поскольку крупность твердых частиц материала во внутренней и внешней концентрических полостях и дополнительной внешней полости разная, то размер измельчающих элементов в дополнительной внешней полости меньше, чем в предыдущих, что также способствует увеличению эффективности измельчения. Скорость движения гидросмеси в полостях регулируется изменением перепада высоты гидросмеси во внутренней и внешней концентрической полостях и дополнительной внешней полости за счет изменения высоты сливных порогов.

Готовый измельченный продукт из дополнительной внешней полости через сливной порог сливных желобов 11 по патрубкам 12 сливается в приемную емкость (на рис. не показано).

Таким образом, за счет конструктивного выполнения камеры по предлагаемому варианту обеспечивается возможность реализации мокрого способа измельчения материала в вибромельнице с получением более тонкого помола при меньших энергозатратах. В настоящее время изготовлен экспериментальный образец вибромельницы, который прошел успешные испытания на стендовой установке, фото которой представлено на рис. 4.

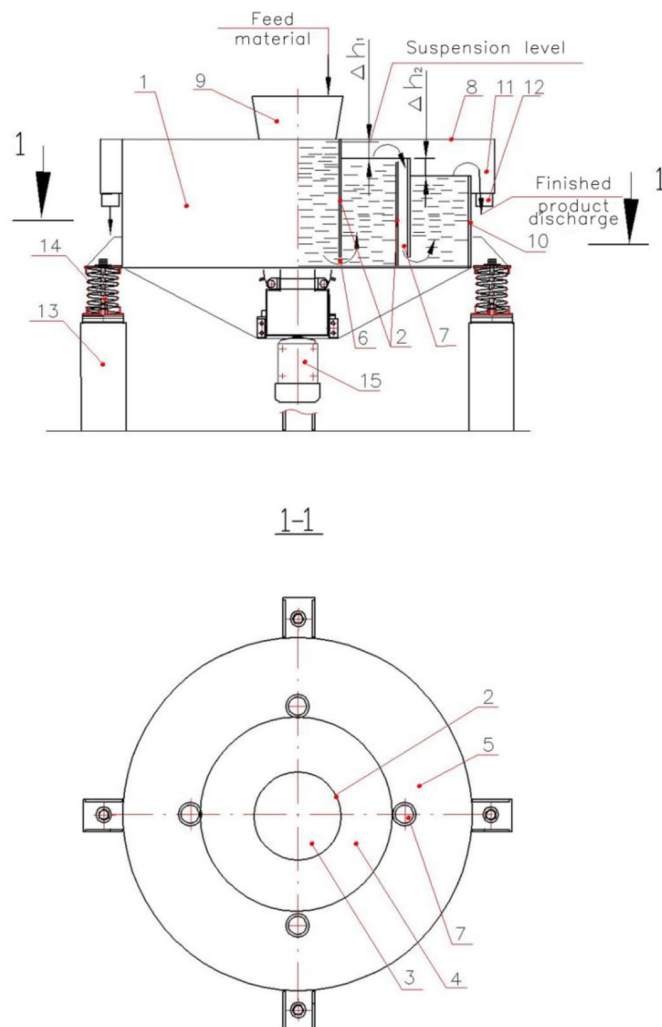


Рис. 3. Бикамерная вибромельница МиС. Экспериментальный образец: 1 – корпус; 2 – вставки; 3 – внутренняя полость; 4 – внешняя полость; 5 – внешняя дополнительная полость; 6 – окна; 7 – спускные каналы; 8 – верхняя крышка; 9 – питающий патрубок; 10 – боковая стенка; 11 – сливные желоба; 12 – сливной патрубок; 13 – рама; 14 – пружины; 15 – вибровозбудитель

Fig. 3. Two-compartment vibrating mill of MiS type. Experimental unit: 1 – case; 2 – inserts; 3 – internal cavity; 4 – external cavity; 5 – external additional cavity; 6 – windows; 7 – drain channels; 8 – top cover; 9 – feed pipe; 10 – side wall; 11 – drain troughs; 12 – drain pipe; 13 – frame; 14 – springs; 15 – vibration exciter

В таблице 2 представлена техническая характеристика экспериментального образца бикамерной вибромельницы типа МиС.

Из мельницы готовое топливо самотеком поступает в приемную емкость, откуда насосом перекачивается в расходно-аккумулирующие емкости.

Водоугольное топливо из расходно-аккумулирующих емкостей насосом с регулируемым приводом дозировано подается на сжигание через форсунки в топку вихревого типа котельного агрегата. Котельный агрегат, изготовленный на базе котла «Теплотрон» (г. Новокузнецк), состоит из двух частей: вертикальной вихревой топки и теплообменника газ-вода /9/. Для рас-





Рис.4. Экспериментальный участок приготовления топлива

Fig. 4. Experimental section of fuel preparation

Таблица 2. Техническая характеристика вибромельницы типа МиС

Table 2. Technical characteristics of the vibrating mill of MiS type

№ п/п	Наименование показателя	Единицы измерения	Значение
			МиС-100
1	Назначение	мокрый помол материалов	
2	Производительность	л/ч	200
3	Мощность электродвигателя	кВт	2 x 1,5
4	Масса (без мелющих тел)	кг	700
5	Масса мелющих тел	кг	350 (80/270)
6	Габаритные размеры	мм	1370 x 1280 x 1020
7	Суммарный объем камер	л	100
8	Диаметр шаров	мм	25÷40

пыления ВУТ в топке используется сжатый воздух от компрессорной станции. Подача в топку распыленного сжатым воздухом водоугольного топлива осуществляется тангенциально условной цилиндрической поверхности вихревой камеры сжигания. Для горения топлива в топку также тангенциально вентилятором подается вторичный воздух. Образующиеся в результате горения ВУТ дымовые газы, проходя из топки в теплообменник, отдают тепло прокачиваемой через котельную установку воде. Далее охлажденные газы проходят систему очистки в виде батарейного циклона с тканевым фильтром и удаляются дымососом в атмосферу через дымовую трубу. Съем тепла нагретой воды производится с помощью двух калориферов. Учитывая, что мощность калориферов недостаточна, дополнительное удаление тепла производится путем слива горячей воды в канализацию при соответствующем пополнении холодной воды из внешнего источника (евробаков с водой).

Технология перевода котельного агрегата на полное сжигание ВУТ предусматривает предварительный нагрев топки котла путем сжигания рядового угля на колосниковой решетке до температуры воспламенения ВУТ, которая зависит от марки угля (500-850 °С). Затем осуществляется постепенное замещение сгораемого угля увеличенной подачей ВУТ до выхода на стабильный режим работы котла без подсветки дополнительным топливом – углем.

Разработанный котел (см. рис. 5) состоит из вертикального цилиндрического корпуса с водоохлаждаемой рубашкой, колосниковой решетки и зольника. Наружная поверхность цилиндрического корпуса теплоизолирована. На боковой поверхности корпуса смонтированы горелочные устройства с форсунками и щелевые сопла для тангенциальной подачи дутьевого воздуха. Внутренняя цилиндрическая поверхность камеры сгорания над колосниковой решеткой теплоизолирована термостойким материалом. Для подвода и отвода жидкого теплоносителя смонтированы соответствующие патрубки. Для теплосъема оборудована система теплообмена между горячими продуктами горения и теплоносителем. Корпус котла и система теплообмена связаны газоходом. Корпус котла с зольником и система теплообмена установлены на раме.

Котел работает следующим образом.

Первоначально производится прогрев внутренней полости корпуса котла – камеры сгорания, размещенной над колосниковой решеткой, за счет сжигания твердого топлива (уголь, дрова и др.) на колосниковой решетке. Затем начинается подача суспензионного водоугольного топлива.

Суспензионное водоугольное топливо подается в котел насосом из емкости хранения через форсунки горелочных устройств. В форсунки также подается распыляющий компрессорный воздух. Струи распыленного топлива подаются тангенциально условной поверхности внутри камеры сгорания корпуса котла. Одновременно тангенциально в камеру сгорания подается воздух через щелевые сопла, ориентированные в том же направлении, что и горелочные устройства. За счет организации вихревого движения в корпусе котла осуществляется эффективное сгорание распыленного топлива. Возможные несгоревшие крупные частицы угля выпадают на



Рис. 5. Фото котельной установки

Fig. 5. Photo of a boiler unit

Таблица 3. Результаты испытаний

Table 3. Test results

№	Наименование параметра	Единица измерения	Значение	
1	Расход ВУТ	л/ч (кг/ч)	136 (170)	
2	Теплопроизводительность котла	Гкал/ч (МВт)	0,53 (0,62)	
3	Общий расход воды	м <sup>3</sup> /ч	19,6	
4	Температура воды на входе в котел	°С	83	
5	Температура воды на выходе из котла	°С	110	
6	Температура горения топлива в топке котла	°С	1100	
7	Температура уходящих газов	°С	270	
8	Состав дымовых газов: Оксиды азота: NO + NO <sub>2</sub> Оксид углерода: CO Двуокись серы: SO <sub>2</sub>	мг/м <sup>3</sup>	Полученное значение	Норма
			194+30=224	750
			102	375
			234	400
9	КПД котла (норма для угольных котлов малой мощности)	%	86	81

колосниковую решетку, где догорают, создавая при этом дополнительную «подсветку» в зоне горения распыленного топлива. Крупные частицы золы и шлаковые отложения, накапливаемые на колосниковой решетке, периодически разгружаются в зольник. Образующиеся при сгорании топлива горячие газы через внутреннюю полость крышки котла и газоход поступают в систему теплообмена. В результате происходит теплообмен между горячими газами и жидким теплоносителем. Частичный теплообмен между продуктами горения и жидким теплоносителем происходит также в корпусе котла за счет наличия водоохлаждаемой рубашки. Надежная и эффективная работа котла обеспечивается также наличием адиабатических или близких к ним условий в зоне горения топлива.

Транспортирование дымовых газов из топки в экономайзер предусмотрено с помощью дымососа. После экономайзера дымовые газы поступают в двухступенчатый пылеуловитель, а затем через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

В таблице 3 представлены результаты испытаний по сжиганию опытной партии суспензионного водоугольного топлива, полученной на основе представленной пробы ФК (табл. 2).

В процессе испытаний было установлено, что приготовленное топливо обладает необходимыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками для эффективного сжигания вихревым способом. Процесс горения ВУТ в котле стабилен без подачи дополнительного топлива.

Из полученных данных следует, что полезная тепловая мощность котельного агрегата составила 0,53 Гкал/ч (0,62 МВт) при КПД 86 %. В расчете КПД были учтены потери тепла с дымовыми газами и от поверхностей котельного агрегата в окружающую среду. Высокое значение КПД (на 5 % (абс.) выше нормы для угольных котлов малой мощности и практически со-

ответствует уровню КПД газовых котлов) объясняется применением высокоэффективной вихревой системы сжигания распыленного тонкодисперсного топлива, при которой механический и химический недожог топлива практически отсутствуют.

### Выводы

1. Технология и аппаратное оформление процесса приготовления ВУТ на основе ФК обеспечивают получение необходимых значений структурно-реологических и теплофизических характеристик суспензионного водоугольного топлива.

2. Технология и аппаратное оформление процесса сжигания ВУТ на основе ФК обеспечивают стабильную работу котла без подсветки дополнительным топливом. При этом достигнута теплопроизводительность котла, равная 0,53 Гкал/ч (0,62 МВт) при КПД 86 %, что на 5 % (абс.) больше проектного КПД угольных котлов малой мощности и соответствует аналогичному параметру газовых котлов.

3. Результаты измерения состава дымовых газов показали, что уровень вредных выбросов в них ниже нормативных значений для угольных котлов малой мощности.

### Список литературы / References

[1] Зайденварг В.Е., Кондратьев А.С., Мурко В.И. Водоугольное топливо, трубопроводное транспортирование и сжигание на электростанциях. *Уголь*, 2019, 8, 76-80 [Zaydenvarg V.E., Kondratyev A.S., Murko V.I. Coal-water Fuel, Pipeline Transportation and Combustion at Power Plants. *Coal*, 2019, 8, 76-80 (in Russian)]

[2] Зайденварг В.Е., Трубецкой К.Н., Мурко В.И., Нехороший И.Х. *Производство и использование водоугольного топлива*. М.: Изд. Академии горных наук, 2001. 175 с. [Zaydenvarg V.E., Trubetskoy K.N., Murko V.I., Nekhoroshy I.Kh. *Production and use of water-coal fuel*. Moscow, Pub. House of Academy of Mining Sciences, 2001, 175 p. (in Russian)]

[3] Мурко В.И., Федяев В.И., Хямäläinen В.А. *Физико-технические основы водоугольного топлива*. Кемерово: Кузбассвуиздат, 2009. 195 с. [Murko V.I., Fedyayev V.I., Härmäläinen V.A. *Physical and technical foundations of water-coal fuel*. Kemerovo, Kuzbassvuzizdat, 2009, 195 p. (in Russian)]

[4] Антипенко Л.А., Вахрушева Г.Д., Мурко В.И., Федяев В.И., Чичиндаев М.Г., Венгер К.Г. Тонко-дисперсные отходы углеобогащения – как сырьевая база для создания энергогенерирующих комплексов. *Уголь*, 2011, 9, 76-77 [Antipenko L.A., Vakhrusheva G.D., Murko V.I., Fedyayev V.I., Chichindaev M.G., Venger K.G. Fine-dispersed Waste Coal as a Raw Material Base for the Creation of Power Generating Complexes. *Coal*, 2011, 9, 76-77 (in Russian)]

[5] Мурко В.И., Хямäläinen В.А., Волков М.А., Баранова М.П. Возможности и перспективы реализации отходов технологии обогащения углей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2019, 6, 165–172 [Murko V.I., Khyamalyaynen V.A., Volkov M.A., Baranova M.P. Opportunities and Prospects for the Implementation of Waste from Coal Processing Technology. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2019, 6, 165-172 (in Russian)]

[6] Fedyayev V.I., Carpenok V.I., Mastikhina V.P., Vakhrusheva G.D., Murko V.I., Inetdinof H.L., Baranova M.P. Study on Preparation of Coal Water Mixture from Rejects. *Clean Coal Technology*, China, 2011, 6, 85-90.

[7] Мурко В.И., Мастихина В.П. Опыт применения и перспективы развития водоугольных суспензий в России. *Сибирский уголь*, 2009, 1(12) [Murko V.I., Mastikhina V.P. Experience of Application and Development Prospects of Water-coal Suspensions in Russia, *Siberian Coal*, 2009, 1 (12) (in Russian)]

[8] Murko V.I., Fedyaef V.I., Carpenok V.I., Inetdinof H.L., Baranova M.P. Possibilities of Coal Water Slurry Combustion Prepared from Rejects in Small and Medium Thermoelectric Units. *Clean Coal Technology*, China, 2011, 6, 113-117.

[9] Мурко В.И., Федяев В.И., Прошунин Ю.Е., Почечуев А.А., Карпенко В.И., Хямяляйнен В.А. Результаты сжигания суспензионного водоугольного топлива в котле типа «Теплотрон» *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*, 2018, 11(5), 560-566 [Murko V.I., Fedyaev V.I., Proshunin Yu.E., Pochechuev A.A., Karpenok V.I., Khyamalyaynen V.A. Results of Combustion of Suspension Coal-water Fuel in the Boiler of “Teplotron” type. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2018, 11(5), 560-566 (in Russian)]

[10] Мурко В.И., Хямяляйнен В.А., Тайлаков О.В., Федяев В.И., Карпенко В.И., Дорохин Н.С. и др. Создание полупромышленной установки для приготовления и сжигания суспензионного водоугольного топлива с очисткой дымовых газов от оксидов серы. *Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2016: сборник материалов XVI международной научно-практической конференции*, 2016, 181 [Murko V.I., Khyamalyaynen V.A., Tailakov O.V., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Dorokhin N.S. et al. Creation of a semi-industrial plant for the preparation and combustion of suspension coal-water fuel with purification of flue gases from sulfur oxides. *Natural and intellectual resources of Siberia. Sibresource 2016: collection of materials of the XVI international scientific and practical conference*, 2016, 181 (in Russian)]

[11] Мурко В.И., Исмагилов З.Р., Михайлова Е.С., Хямяляйнен В.А., Тайлаков О.В., Мастихина В.П., Карпенко В.И. Результаты испытаний экспериментального комплекса по приготовлению и сжиганию угольных топлив с очисткой дымовых газов. *Углекислотная и экология Кузбасса: сборник тезисов докладов*, 2017, 40 с. [Murko V.I., Ismagilov Z.R., Mikhailova E.S., Khyamalyaynen V.A., Tailakov O.V., Mastikhina V.P., Karpenok V.I. Test results of an experimental complex for the preparation and combustion of coal fuels with flue gas cleaning. *Coal chemistry and ecology of Kuzbass: collection of abstracts*, 2017, 40 p. (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0255

УДК 536.2

## Heat Exchange Modeling in Cooling Fins

**Evgeniy N. Vasil'ev\***

*Institute of Computational Modelling SB RAS  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 30.06.2020, received in revised form 07.07.2020, accepted 14.09.2020

*Abstract.* The article discusses the process of heat exchange of a finned wall with a coolant. The temperature field in the wall volume was determined on the basis of a numerical solution of the two-dimensional heat conduction problem, and the analysis of the characteristics of temperature distributions was carried out according to the simulation results. The values of the heat transfer coefficient of cooling fins with rectangular cross section were calculated for two variants of heat transfer conditions at the end of the fins in a wide range of dimensionless parameters. The error in calculating the heat transfer coefficient in the approximation of a thin fin was determined by means of a one-dimensional computational model.

*Keywords:* finned wall, cooling fin, heat exchange, thermal conductivity, heat transfer coefficient, Biot number.

Citation: Vasil'ev E.N. Heat exchange modeling in cooling fins, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 669-676. DOI: 10.17516/1999-494X-0255

## Моделирование теплообмена в ребрах охлаждения

**Е.Н. Васильев**

*Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, Красноярск*

*Аннотация.* В статье рассматривается процесс теплообмена ребренной стенки с теплоносителем. Температурное поле в объеме стенки определяли на основе численного решения двумерной задачи теплопроводности, по результатам моделирования проведен анализ особенностей распределений температуры. Рассчитаны значения коэффициента теплопередачи ребер охлаждения прямоугольного сечения для двух вариантов условий теплообмена на торце ребра в широком диапазоне безразмерных параметров. Определена погрешность расчета коэффициента теплопередачи в приближении тонкого ребра при использовании одномерной вычислительной модели.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: ven@icm.krasn.ru



**Ключевые слова:** оребренная стенка, ребро охлаждения, теплообмен, теплопроводность, коэффициент теплопередачи, число Био.

Цитирование: Васильев Е.Н. Моделирование теплообмена в ребрах охлаждения / Е.Н. Васильев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 669-676. DOI: 10.17516/1999-494X-0255

## Введение

Для интенсификации теплопередачи и уменьшения габаритов в теплообменниках широко используют оребренные поверхности, которые находятся в непосредственном контакте с жидким или газообразным теплоносителем [1-3]. Характеристики теплообменников зависят от параметров оребренных поверхностей и величины локального коэффициента теплоотдачи на поверхности контакта ребер и теплоносителя. Определение конструкции, обеспечивающей заданные характеристики теплопередачи и оптимизацию параметров оребренной стенки, проводят на основе тепловых расчетов. Характеристики теплопередачи рассчитывают по температурным распределениям по поверхности оребренной стенки, полученным из решения задачи теплопроводности. При решении задачи теплопроводности, как правило, делают различные упрощающие допущения. Одним из наиболее распространенных допущений при определении характеристик теплопередачи ребер охлаждения является приближение тонкого ребра, когда пренебрегают температурными градиентами по толщине и вычисления проводят на основе одномерной модели. При использовании такого допущения необходимо обоснование его правомерности на основе оценки погрешности вычислений.

Цель настоящей работы – расчет характеристик теплопередачи стенки, основанных на моделировании процесса теплопередачи в ребристом теплообменнике с помощью численного решения как двумерного, так и одномерного уравнения теплопроводности, определение погрешности расчета коэффициента теплопередачи при использовании одномерной модели.

## Расчет температурного поля в оребренной стенке

Задачей теплового расчета оребренной стенки является определение температурного поля и коэффициента теплопередачи, отражающего отношение передаваемой тепловой мощности к разности температур. Рассмотрим процесс теплообмена в приближении «толстого» ребра, когда градиенты температуры сопоставимы по ширине и высоте. Поперечное сечение фрагмента оребренной стенки приведено на рис. 1.

Расчет температурного поля в стенке проводили на основе решения стационарной двумерной задачи теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Расчетная область задачи, которая представляет собой половину периодически повторяющегося фрагмента оребренной стенки, выделена на рис. 1 штриховым контуром. На внутренних границах стенки задают условие симметрии по тепловому потоку, при котором  $\partial T / \partial x = 0$  и  $q = 0$ , а на поверхностях контакта с теплоносителем (включая торцевую поверхность ребра) – граничные условия третьего рода

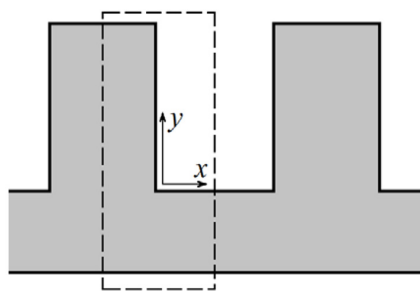


Рис. 1. Схема оребренной стенки и границы расчетной области

Fig. 1. Diagram of the ribbed wall and the boundary of the computational domain

$$\left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial l} + \alpha T \right]_{l=0,L} = q|_{l=0,L}, \quad (2)$$

здесь  $T$  – температура;  $x, y$  – пространственные координаты;  $l = x, y$  и  $L$  – размер, соответствующий этим координатам;  $q$  – плотность теплового потока. При этом полагалось, что температура теплоносителя, контактирующего с оребренной поверхностью, имеет постоянное значение. Для решения уравнений (1) и (2) применен метод суммарной аппроксимации с расщеплением задачи по пространственным координатам [4, 5].

Анализ особенностей процесса теплопередачи в оребренной стенке проведен при следующих параметрах задачи. В качестве материала стенки рассматривали сталь 12X18H10T, имеющую коэффициент теплопроводности  $\lambda = 19$  Вт/(м·К). Температуру теплоносителя, контактирующего с верхней оребренной поверхностью, задавали постоянной и равной 50 °С, на нижней поверхности основания ее значение составляло 60 °С. Значение локального коэффициента теплообмена  $\alpha$  на поверхности стенки задавали равным 5,3 кВт/(м<sup>2</sup>·К), что соответствует значению для теплоносителя ЛЗТК-2 при рассматриваемых температурах и параметрах стенки [6].

На рис. 2 приведено распределение температуры для следующих геометрических размеров оребренной стенки: толщина ребра  $\delta = 1,5$  мм, высота ребра  $h = 2,5$  мм, толщина стенки 1,6 мм, расстояние между ребрами 1,3 мм. На рисунке размер основания в направлении  $x$  составляет 1,4 мм, поскольку расчет проводили для половины периодически повторяющегося фрагмента оребренной стенки. Значения температуры на соответствующих изолиниях даны в градусах Цельсия. В основании стенки наибольший градиент температуры наблюдается в направлении  $y$ , в направлении  $x$  температурный градиент заметен в верхней части основания и практически отсутствует в нижней части. В ребре градиент температуры наблюдается в обоих пространственных направлениях. Следует отметить, что выпуклость изолиний в ребре и основании имеет противоположные направления, а распределение температуры на нижней границе ребра близко к однородному.

Изменение геометрических размеров стенки отражается на характере температурного поля. На рис. 3 отражены результаты расчета при уменьшении толщин ребра ( $h = 0,7$  мм) и основания стенки (0,5 мм), при этом высота ребра и ширина основания не менялись. В основании стенки неоднородность температурного поля выросла в обоих направлениях, в ребре увеличение температурного перепада по высоте сопровождается его снижением в поперечном



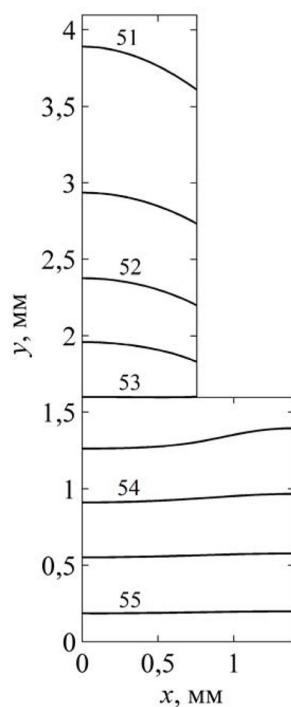


Рис. 2. Температурное поле в оребренной стенке при толщине ребра 1,5 мм и стенки 1,6 мм

Fig. 2. Temperature field in a finned wall with a rib thickness of 1.5 mm and a wall of 1.6 mm

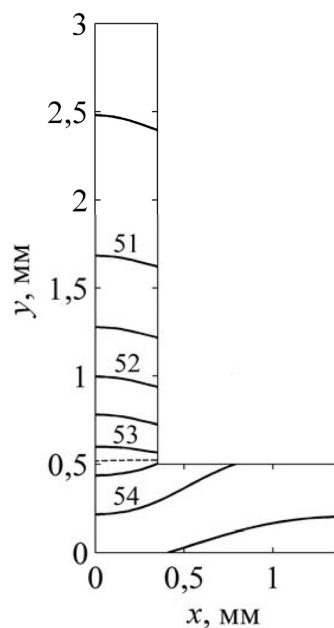


Рис. 3. Температурное поле в оребренной стенке при толщине ребра 0,7 мм и стенки 0,5 мм

Fig. 3. Temperature field in a finned wall with a rib thickness of 0.7 mm and a wall of 0.5 mm

направлении. В данном расчете также выпуклость изолиний вблизи границы имеет противоположную направленность, а на самой границе сохраняется практически постоянное значение температуры, соответствующее дополнительной изолинии со значением 53,5 °С, отображенной штриховой линией.

Полученные результаты расчетов показали существенное влияние геометрических параметров на температурное поле, что в итоге отражается на интегральном параметре, описывающем интенсивность теплообмена стенки с теплоносителем, – коэффициенте теплопередачи  $k$ .

### Коэффициент теплопередачи ребра охлаждения

Коэффициент теплопередачи  $k$  является интегральной характеристикой процесса теплообмена ребра с теплоносителем. Расчеты коэффициента теплопередачи проведем для отдельного ребра, оно – основной теплопередающий элемент развитой оребренной стенки, поскольку с его поверхности отводится наибольшее количество теплоты. Расчеты распределения температуры в ребре проводили с помощью двух вычислительных моделей: одномерной и двумерной. Сравнение результатов расчетов позволяет оценить погрешность применения более простой одномерной математической модели, в которой не учитывается неоднородность распределения температуры по толщине ребра. На боковых поверхностях ребра задавали теплообмен с теплоносителем, на нижней границе ребра – фиксированное значение температуры; для двумерной

задачи использование такого граничного условия обосновано результатами расчетов, представленными на рис. 2 и 3. На верхнем торце ребра рассматривались два варианта граничного условия, в первом задавались условия теплообмена с теплоносителем, во втором  $\partial T/\partial x=0$  соответствует теплоизолированной поверхности или границе симметрии.

Величину  $k$  для отдельного ребра определим как отношение передаваемой тепловой мощности к разности температур теплоносителя  $T_h$  и нижней границы ребра, а также к площади этой граничной поверхности. Суммарная величина теплового потока, передаваемого ребром теплоносителю, рассчитана из решения задачи теплопроводности по распределению температуры  $T_s$  на границах ребра, контактирующих с теплоносителем, и локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  по формуле  $q = \alpha(T_s - T_h)$ . Серия расчетов проведена с помощью двумерной модели для параметров ребра, соответствующих широкому диапазону значений числа Био  $Bi = \alpha\delta/\lambda$ . На рис. 4 отражены зависимости коэффициента теплопередачи  $k$  от безразмерной высоты ребра  $2h/\delta$  при значениях  $Bi = 0,01, 0,03, 0,1, 0,3, 1$  и  $3$ . Здесь тонкой линией нанесены зависимости, соответствующие теплоизолированному верхнему торцу ребра, толстые относятся к случаю теплообмена торца с теплоносителем. Как и следовало ожидать, исключение теплообмена на верхнем торце ребра приводит к снижению коэффициента теплопередачи. Это снижение  $k$  наблюдается только на растущих участках зависимостей, когда верхняя торцевая часть вносит заметный вклад в общий теплообмен ребра. Горизонтальная часть зависимостей соответствует таким значениям высоты ребра, при которых практически вся теплота от ребра отведена нижней частью ребра, а температура верхней части сравнивается с температурой теплоносителя. В этом случае теплопередача с торца ребра исключается, поэтому зависимости, соответствующие разным условиям теплообмена торца, сливаются в одну линию.

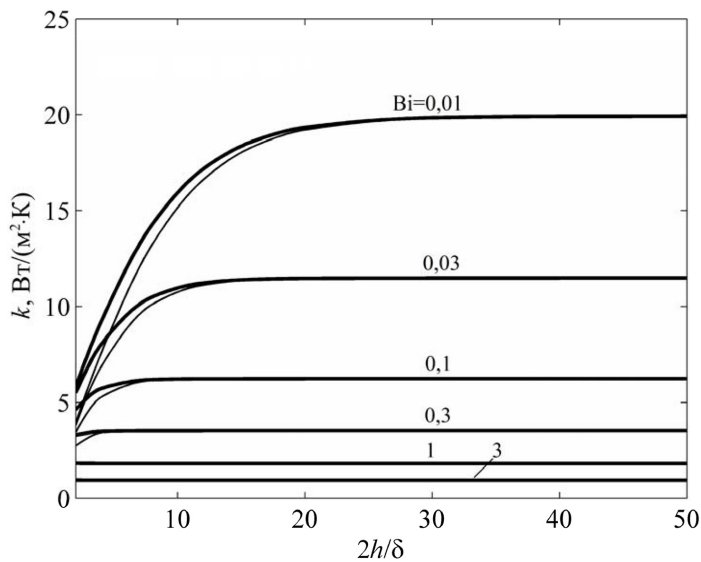


Рис. 4. Зависимости коэффициента теплопередачи ребра при теплоизолированном торце (тонкие линии) и при его теплообмене с теплоносителем (толстые линии)

Fig. 4. Dependences of the heat transfer coefficient of the fin with a thermally insulated end (thin lines) and during its heat exchange with the coolant (thick lines)

Одним из наиболее распространенных допущений при определении характеристик теплопередачи ребер охлаждения является приближение тонкого ребра, когда пренебрегают температурными градиентами по толщине и вычисления проводят на основе одномерной модели. К достоинствам такой модели относятся: минимум требуемых вычислительных ресурсов, простота анализа полученных результатов. Недостатки модели – присущая ей погрешность вычислений и необходимость контроля величины погрешности для каждой задачи. В качестве критерия использования приближения тонкого ребра взято число  $Bi$ , отражающее соотношение термических сопротивлений ребра и теплопередачи на его поверхности. При условии  $Bi \ll 1$  градиент температуры по толщине ребра мал и им можно пренебречь. Граница применимости приближения в разных работах принимается различной, так в [7] граничное значение  $Bi=0,14$ , а в [8] эта величина  $Bi$  определена равной 0,6. В общем случае выбор приближения определяется спецификой задачи и необходимой точностью расчетов. При выборе приближения в качестве исходной информации могут быть использованы данные по погрешности одномерной модели. Для определения погрешности были проведены сравнительные расчеты по одномерной и двумерной моделям, по которым вычислена относительная величина разности решений в виде  $\Delta k = (k_2 - k_1)/k_2$ , здесь  $k_1$  и  $k_2$  – значения коэффициентов теплопередачи, рассчитанные в одномерном и двумерном приближениях. Зависимости  $\Delta k(2h/\delta)$ , полученные из расчетов при теплообмене верхнего торца ребра с теплоносителем, приведены на рис. 5 при значениях  $Bi = 0,01, 0,03, 0,1, 0,3, 1$  и 3. На рис. 6 отображены аналогичные зависимости для варианта с теплоизолированным торцом ребра. Зависимости, приведенные на рис. 5 и 6, позволяют для заданных параметров задачи оценивать величину погрешности расчета характеристик ребра и производить обоснованный выбор модельного приближения с учетом требуемой точности.

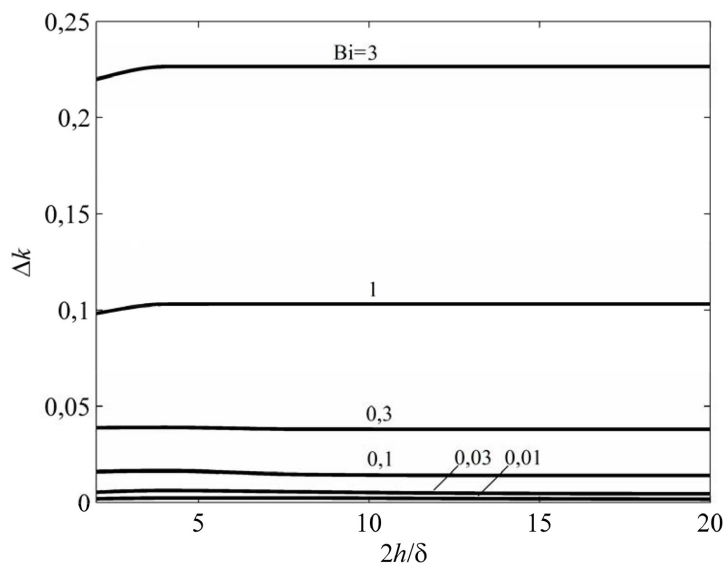


Рис. 5. Относительная погрешность расчета коэффициента теплопередачи с учетом теплообмена торца ребра с теплоносителем

Fig. 5. Relative error in calculating the heat transfer coefficient taking into account heat transfer of the end of the fin with the coolant

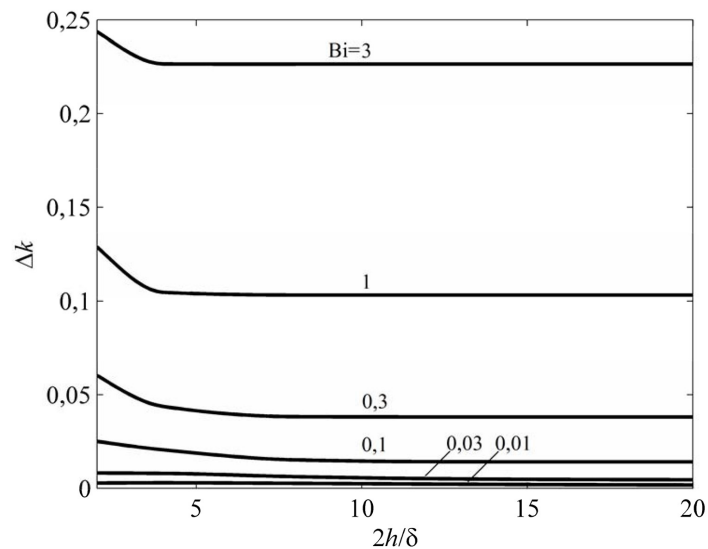


Рис. 6. Относительная погрешность расчета коэффициента теплопередачи при теплоизолированном торце ребра

Fig. 6. Relative error in calculating the heat transfer coefficient with a thermally insulated end of the fin

### Заключение

Проведены расчеты процесса теплопередачи в двумерной постановке для двух конфигураций оребренной стенки. Результаты расчетов температурного поля позволили выявить особенности температурного поля и влияние геометрических параметров стенки на неоднородность температурного распределения. Получены зависимости коэффициента теплопередачи от безразмерного параметра  $2h/\delta$  при использовании двух видов граничного условия на верхнем торце ребра. Определена относительная погрешность  $\Delta k$  одномерной модели, рассчитанные зависимости  $\Delta k(2h/\delta)$  в широком диапазоне числа  $Bi$  позволяют проводить оперативную количественную оценку погрешности одномерной модели и дают возможность применения приближения термически тонкого ребра.

### Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта «Теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена в двухфазных системах термического контроля» (код проекта 18-41-242005).

The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research, Government of Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk Regional Fund of Science, to the research project: “Theoretical and experimental investigation of heat and mass transfer processes in the two-phase system of thermal control” (project no. 18-41-242005).

## Список литературы / References

- [1] Ройзен Л.И., Дулькин И.Н. *Тепловой расчет оребренных поверхностей*. М.: Энергия, 1977. 256 с. [Roizen L.I., Dulkan I.N. *Thermal design of finned surfaces*. Moscow, Energiya, 1977, 256 p. (In Russian)]
- [2] Чичиндаев А.В. *Оптимизация компактных пластинчаторебристых теплообменников*. Новосибирск: НГТУ, 2003. 400 с. [Chichindaev A.V. *Optimization of compact plate-fin heat exchangers*. Novosibirsk: NGTU, 2003. 400 p. (In Russian)]
- [3] Васильев Е.Н., Гейнц Э.Р., Деревянко В.А., Коков Е.Г., Кукушкин С.В. Термоэлектрический блок охлаждения. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2019, 12(2), 146–152. [Vasil'ev E.N., Gejnts E.R., Derevyanko V.A., Kokov E.G., Kukushkin S.V. Thermoelectric cooling block, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, 12(2), 146-152. (In Russian)]
- [4] Самарский А.А. *Теория разностных схем*. М.: Наука, 1989. 616 с. [Samarskii A.A. *The theory of difference schemes*. Moscow, Nauka, 1989, 616 p. (In Russian)]
- [5] Васильев Е.Н., Деревянко В.В. Математическая модель процессов теплообмена в сотовой панели с тепловыми трубами. *Вестник СибГАУ*, 2010, 2 (28), 4-7. [Vasil'ev E.N., Derevyanko V.V. Mathematical model of heat exchange processes in honeycomb panels with heat pipes. *Vestnik SibGAU*, 2010, 2 (28), 4-7 (In Russian)]
- [6] Васильев Е.Н. Расчет характеристик теплопередачи оребренной стенки теплообменника, *Решетневские чтения, материалы XXIII Международной научно-практической конференции*. Красноярск, 2019, 1, 237-238. [Vasil'ev E.N. Calculation of heat transfer characteristics of finned wall of heat exchanger. *Reshetnev reading, materials XXIII Intern. Scientific. Conf.* Krasnoyarsk, 2019, 1, 468–469 (In Russian)]
- [7] Горев В.А., Фомина М.В. Упрощенный расчет теплообмена на плоских поверхностях. *Пожаровзрывобезопасность*, 2016, 25(3), 5-14. [Gorev V.A., Fomina M.V. Simplified calculation of heat on a flat surface. *Fire and Explosion Safety*, 2016, 25(3), 5-14. (In Russian)]
- [8] Shih C.C., Westwater J.W. Effect of geometry and wall thickness on heat transfer from longitudinal fins to boiling liquids. *Fifth International Heat Transfer Conference*, Tokyo, 1974, B1.4, 15-19.

DOI: 10.17516/1999-494X-0256

УДК 621.311, 621.331

## Algorithms for Creating the Digital Twin of a Distributed Generator

**Yuri N. Bulatov<sup>a\*</sup> and Andrey V. Kryukov<sup>b,c</sup>**

<sup>a</sup>*Bratsk State University*

*Bratsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Irkutsk State Transport University*

*Irkutsk, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Irkutsk National Research Technical University*

*Irkutsk, Russian Federation*

Received 23.04.2020, received in revised form 16.08.2020, accepted 10.09.2020

*Abstract.* The article describes the concept of a digital twin of a distributed generator (DG) implemented on the basis of a salient-pole synchronous generator. The structure of the digital twin is presented in the form of a hierarchical fuzzy model built on the experimental data.

For building fuzzy models of individual elements and links of a generator, software algorithms for optimization of the membership functions of term sets and the numbers of knowledge base rules are proposed. The results of experiments on obtaining an optimized neuro-fuzzy model for regulating the rotation speed of the generator rotor are presented. A comparative analysis of the oscillograms of the output signal of the optimized fuzzy model showed a sufficiently high accuracy when using the subtractive clustering method to build a fuzzy logic system. This approach made it possible to significantly reduce the number of term sets and the amount of the fuzzy model rules. The proposed algorithms can be used in further research aimed at industrial implementation of DG digital twins, as well as for solving the problem of tuning automatic regulators of low-power synchronous generators.

*Keywords:* distributed generator, synchronous generator, digital twin, fuzzy model, optimization.

Citation: Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Algorithms for creating the digital twin of a distributed generator, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 677-689. DOI: 10.17516/1999-494X-0256

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: bulatovyura@yandex.ru

## Алгоритмы построения цифрового двойника установки распределенной генерации

Ю.Н. Булатов<sup>а</sup>, А.В. Крюков<sup>б,в</sup>

<sup>а</sup>Братский государственный университет  
Российская Федерация, Братск

<sup>б</sup>Иркутский государственный университет  
путей сообщения

Российская Федерация, Иркутск

<sup>в</sup>Иркутский национальный исследовательский  
технический университет

Российская Федерация, Иркутск

*Аннотация.* В статье описана концепция построения цифрового двойника установки распределенной генерации (РГ), реализованной на основе неявнополюсного синхронного генератора. Представлена его структура в виде иерархической нечеткой модели, построенной с использованием экспериментальных данных.

Для формирования нечетких моделей отдельных элементов и связей генератора предложены программно реализованные алгоритмы оптимизации функций принадлежности терм-множеств и числа правил базы знаний. Представлены результаты экспериментов по получению оптимизированной нейро-нечеткой модели регулирования скорости вращения ротора генератора. Сравнительный анализ осциллограмм выходного сигнала оптимизированной нечеткой модели показал достаточно высокую точность при использовании метода субтрактивной кластеризации для построения системы нечеткого логического вывода. Такой подход позволил значительно уменьшить количество терм-множеств и число правил нечеткой модели. Предложенные алгоритмы могут использоваться при проведении дальнейших исследований, направленных на промышленную реализацию цифровых двойников установок РГ, а также для решения задачи настройки автоматических регуляторов синхронных генераторов малой мощности.

*Ключевые слова:* установка распределенной генерации, синхронный генератор, цифровой двойник, нечеткая модель, оптимизация.

Цитирование: Булатов, Ю.Н. Алгоритмы построения цифрового двойника установки распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 677-689. DOI: 10.17516/1999-494X-0256

### Введение

Для повышения надежности электроснабжения потребителей и формирования сетей Smart Grid [1–5] применяются установки распределенной генерации (РГ), в том числе работающие на основе возобновляемых энергоресурсов [6–11], а также накопители электроэнергии (НЭ) [12–14] и различные устройства для интеллектуального управления режимами. Для оптимального решения задачи управления сетями Smart Grid требуется применение полной математической модели системы электроснабжения. Современные цифровые технологии дают возможность построения развитых моделей энергетических установок, позволяющих комплексно решать задачи диагностики и управления. Один из способов формирования таких моделей может быть основан на концепции цифровых двойников, дающих возможность получать все

необходимые данные, характеризующие функционирование физического объекта или системы [15–19]. Цифровой двойник включает детальную математическую модель, параметры которой уточняются с помощью информации, поступающей от измерительно-информационных систем.

Кроме понятия «цифровой двойник» используется термин «цифровая тень», определяющий наличие связей и зависимостей, описывающих поведение реального физического объекта и содержащихся в больших данных (big data), получаемых от реального объекта при помощи средств промышленного интернета [15]. Цифровая тень позволяет прогнозировать поведение реального объекта, но только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных, что является основным ее отличием от цифрового двойника.

Создание цифрового двойника реального электроэнергетического оборудования или системы электроснабжения должно базироваться на применении различных датчиков для уточнения математической модели, а также на использовании интернета вещей (IoT) и систем сбора данных для их последующей обработки на основе интеллектуальных технологий.

В статье представлены основные положения концепции построения цифрового двойника установки РГ, работающей на основе синхронного генератора, оснащенного нечетким блоком автоматической настройки регуляторов возбуждения (АРВ) и скорости (АРС) вращения ротора [20]. Рассмотрена структура цифрового двойника в виде многосвязной модели, использующей экспериментальные данные. Представлены результаты компьютерных исследований по получению оптимизированной нейро-нечеткой модели регулирования скорости вращения ротора генератора.

#### **Описание концепции и структуры построения цифрового двойника установки РГ**

В качестве объекта, для которого предлагается построение цифрового двойника, рассмотрим турбогенераторную установку небольшой мощности, реализованную на основе неявнополюсного синхронного генератора. Малая постоянная инерции ротора требует учета при настройке взаимного влияния АРВ и АРС. Кроме того, для оптимального управления необходимо корректировать настройки регуляторов при значительных изменениях режимов работы установок РГ или электроэнергетической системы (ЭЭС) при параллельной работе РГ и ЭЭС. Выполнить эти требования возможно путем использования интеллектуальных алгоритмов управления. На рис. 1 представлена структурная схема установки РГ [20].

Принцип действия рассматриваемой системы управления заключается в идентификации режима работы установки РГ и коррекции коэффициентов настройки регуляторов в случае существенных изменений режимов. Для идентификации предложено использовать адаптивную сеть на основе системы нечеткого вывода (ANFIS), представляющую собой один из вариантов гибридных нейро-нечетких сетей. В целом ANFIS реализует систему нечеткого вывода Сугено в виде пятислойной нейронной сети прямого распространения сигнала [21]. Задача идентификации режима, решаемая блоком ANFIS, описана в [20].

Нечеткий регулятор с блоком автонастройки представляет собой систему нечеткого логического вывода с модулями идентификации цифровой модели установки РГ и согласованной настройки АРВ и АРС [20]. Применение согласованной настройки [22] позволяет сформировать начальную базу знаний fuzzy-регулятора. Затем модуль идентификации на основе экспе-



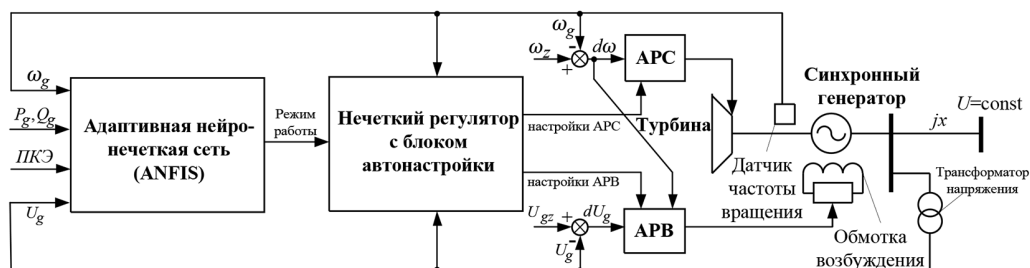


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления APB и APC установки РГ: ПКЭ – показатели качества электроэнергии

Fig. 1. Structural scheme of adaptive system for control AVR and ASR of the DG plant: PQI – power quality indicators

риментальных данных формирует цифровую модель для дальнейшего формирования цифрового двойника.

Предлагаемая концепция основана на представлении объекта в виде многосвязной структуры, имеющей определенное число входных и выходных параметров и связей, формируемых на основе экспериментальных данных. Предлагаемая структура цифрового двойника представлена на рис. 2. При необходимости добавления других контролируемых параметров предлагаемую структуру можно модернизировать.

Основные элементы установки РГ, такие как регуляторы, турбина, система возбуждения, представлены в виде нечетких моделей, определяющих зависимости входных и выходных переменных на основе нечеткого логического вывода. Отдельные связи параметров синхронного генератора также представлены в виде блоков нечеткого логического вывода ( $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$ ), в совокупности образующих иерархическую нечеткую модель генератора. Элементы установки РГ позволяют адекватно описывать зависимости входных и выходных переменных, используя небольшое количество правил. В целом построение всей совокупности связей предлагаемой структуры основано на применении иерархических нечетких систем логического вывода [23], что позволяет значительно уменьшить размерность базы нечетких правил.

Для уменьшения объема баз правил отдельных блоков установки РГ предлагается использовать метод субтрактивной кластеризации [24] и адаптивную сеть ANFIS, позволяющие на основе получаемых экспериментальных данных от датчиков обучать нейронные сети, синтезировать и обновлять базы знаний нечетких систем. Согласно предлагаемой структуре датчики должны измерять все указанные на рис. 2 параметры. Измерительная система должна обеспечивать определение показателей качества электроэнергии. Для обучения и обновления нечетких моделей измерение параметров необходимо производить в переходных процессах, вызванных изменением режима работы установки РГ в процессе эксплуатации, а также при подаче на выходы регуляторов специальных пробных сигналов малой интенсивности, не нарушающих нормальной эксплуатации. При обновлении нечетких моделей выполняется оптимизация параметров функций принадлежности терм-множеств и уменьшение, при возможности, числа нечетких правил.

Построение оптимизированной нечеткой модели отдельной связи цифрового двойника включает следующие шаги:

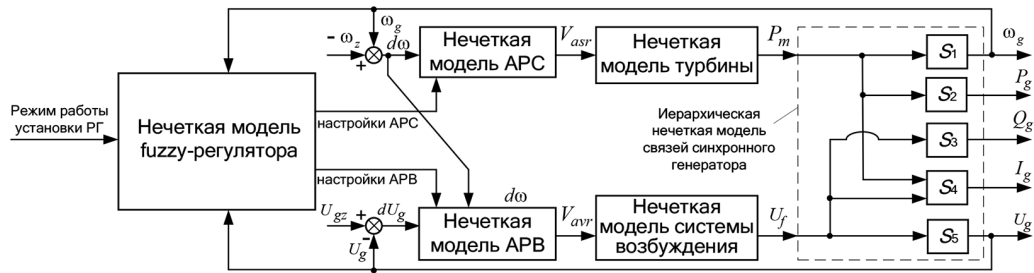


Рис. 2. Структура цифрового двойника установки РГ:  $w_z, w_g$  – соответственно, заданное и текущее значения скорости вращения ротора;  $d\omega$  – отклонение скорости вращения ротора от заданного значения;  $U_{gz}, U_g$  – соответственно, заданное и текущее значения напряжения генератора;  $dU_g$  – отклонение напряжения генератора от заданного значения;  $V_{asr}, V_{avr}$  – соответственно, сигналы управления от АРС и АРВ;  $P_m$  – механическая мощность на валу турбины;  $U_f$  – напряжение на обмотке возбуждения генератора;  $P_g, Q_g$  – активная и реактивная мощности генератора;  $I_g$  – ток генератора

Fig. 2. The structure of DG plant digital twin:  $w_z, w_g$  – accordingly, the set and current values of rotor rotational frequency;  $d\omega$  – the deviation of rotor rotational frequency from the set value;  $U_{gz}, U_g$  – accordingly, the set and current values of the generator voltage;  $dU_g$  – the deviation of the generator voltage from a predetermined value;  $V_{asr}, V_{avr}$  – accordingly, the control signals from AVR and ASR;  $P_m$  – mechanical power on the turbine shaft;  $U_f$  – voltage of the generator excitation winding;  $P_g, Q_g$  – the generator active and reactive powers;  $I_g$  – generator current

1. Снятие экспериментальных данных.
2. Обучение нейронной сети по полученным экспериментальным данным.
3. Перевод данных «вход-выход» обученной нейронной сети в нечеткие переменные.
4. Построение базы знаний нечеткой модели с использованием обученной нейронной сети и метода субтрактивной кластеризации.
5. Использование генетического алгоритма (ГА) для оптимизации параметров функций принадлежности терм-множеств нечеткой модели.

Для описания термов базы знаний может быть использована гауссовская функция принадлежности

$$\mu_A(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $c$  – координата максимума функции принадлежности;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение, которое определяет ширину функции;  $x$  – значение переменной из базового множества.

Процедура оптимизации функций принадлежности заключается в переборе различных значений параметров и оценивании разности между реакциями нечеткой модели и эталонными значениями (экспериментальными данными). При использовании ГА параметры функции принадлежности представляют в хромосоме вещественными числами или двоичными последовательностями с применением одного из известных методов кодирования. Затем к полученной популяции особей применяют процедуру ГА. Блок-схема описанного алгоритма оптимизации функций принадлежности нечеткой модели изображена на рис. 3.

На первом этапе выполняют конструирование нечеткой модели для различных значений параметров функций принадлежности

$$S = (U_n, Y_n, C), \quad (2)$$

где  $\mathbf{U}_n$  – вектор значений входной лингвистической переменной размерностью  $n$ ;  $\mathbf{Y}_n$  – вектор значений выходной лингвистической переменной такой же размерности;  $n$  – общее число строк в нечеткой базе знаний;  $\mathbf{C}$  – вектор значений параметров функций принадлежности, которые необходимо оптимизировать.

Определение функции приспособленности особей осуществляют по разности между реакциями нечеткой модели и экспериментальными данными с помощью следующего квадратичного критерия:

$$J = \sum_{i=1}^n [\text{Def}(\mathbf{Y}_n, \mathbf{C}) - y_i]^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Def – оператор дефазификации, выполняющий перевод нечетких переменных при соответствующих параметрах функций принадлежности в конечные значения выходных параметров модели;  $y_i$  – значения выходных параметров экспериментальных данных при соответствующих входных воздействиях.

В качестве генетических операторов используют отбор, скрещивание и мутацию особей.

Для построения и оптимизации нечеткой модели разработана программа, имеющая Windows – ориентированный интерфейс, в которой реализуются описанные выше алгоритмы [25]. Далее при построении и оптимизации нечеткой модели используют указанную программу.

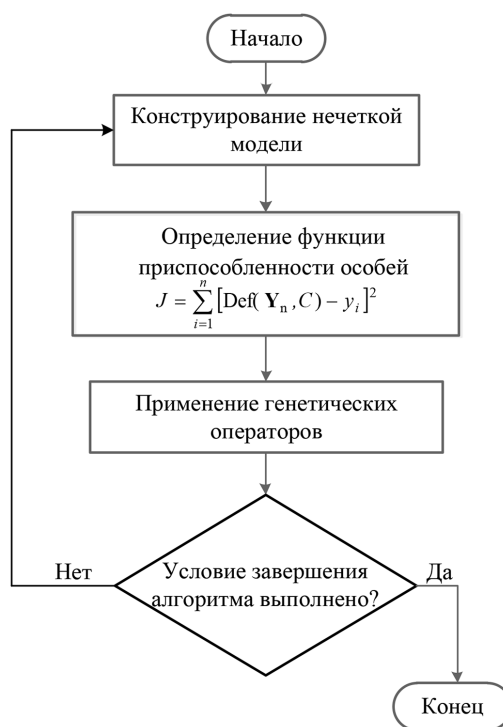


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оптимизации функций принадлежности нечеткой модели

Fig. 3. Block diagram of the algorithm for optimizing the membership functions of a fuzzy model

### Результаты моделирования

Исследования проводили на компьютерной модели турбогенераторной установки с АРВ и АРС мощностью  $3125 \text{ кВ} \times \text{А}$  и напряжением  $10 \text{ кВ}$ , имеющей связь с электроэнергетической системой. Модель выполнена в системе MATLAB. Для исследования предлагаемых алгоритмов построения и оптимизации нечеткой модели были сохранены входной и выходной сигналы, соответствующие механической мощности на валу турбины и скорости вращения ротора генератора. Экспериментальные данные снимали в режиме подключения дополнительной нагрузки (рис. 4). Полученные при моделировании данные использовали для обучения нейронной сети и формирования правил базы знаний нечеткой модели. Неоптимизированная нечеткая модель при испытании дает отклик, показанный на рис. 4б, где видно некоторое отклонение от экспериментальной характеристики.

Проведение процедуры оптимизации функций принадлежности и минимизации числа правил позволяет получить отклик нечеткой модели практически совпадающий с эталонными

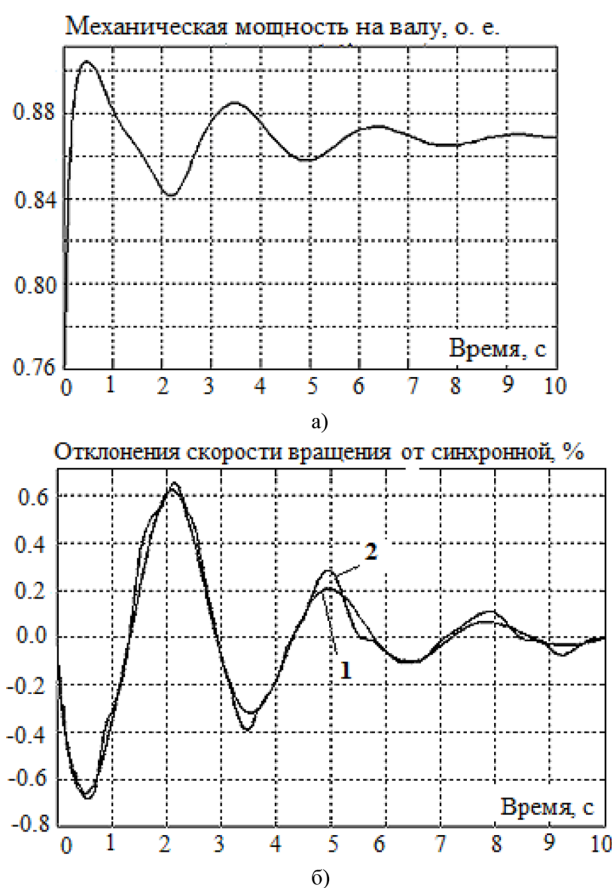


Рис. 4. Характеристики входного (а) и выходного сигналов (б): 1 – экспериментально полученная (эталонная) характеристика скорости вращения ротора генератора; 2 – характеристика скорости, сформированная с помощью системы нечеткого логического вывода

Fig. 4. Characteristics of the input (a) and output signals (b): 1 – experimentally obtained (reference) characteristic of the generator rotor speed; 2 – speed characteristic generated using a fuzzy inference system

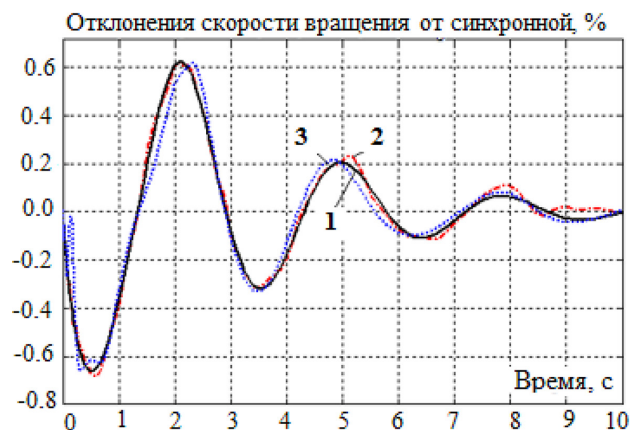


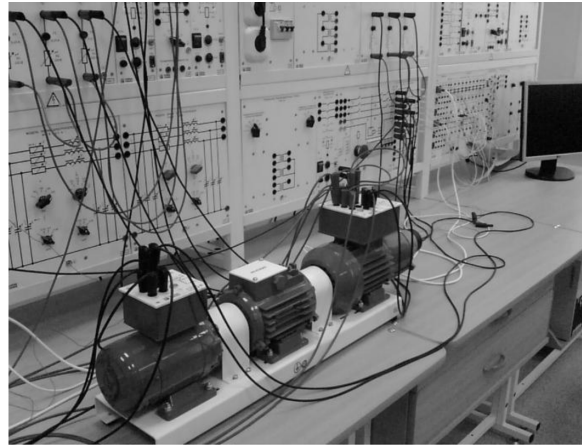
Рис. 5. Характеристика скорости вращения ротора генератора при подключении дополнительной нагрузки: 1 – экспериментальные данные; 2 – нечеткая оптимизированная модель без использования метода субтрактивной кластеризации (91 правило); 3 – нечеткая оптимизированная модель с использованием метода субтрактивной кластеризации (8 правил)

Fig. 5. The characteristic of the rotation rotor speed of the generator when connecting an additional load: 1 – experimental data; 2 – fuzzy optimized model without using the method subtractive clustering (91 rules); 3 – fuzzy optimized model using the subtractive clustering method (8 rules)

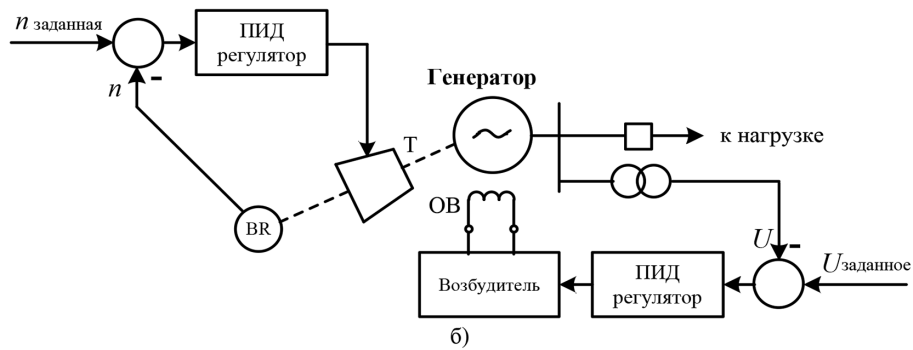
ми значениями. Сравнительный анализ осциллограмм выходного сигнала построенной оптимизированной модели показывает приемлемую точность в случае использования метода субтрактивной кластеризации, который также позволяет уменьшить количество терм-множеств и число правил нечеткой модели (рис. 5).

Построение и оптимизацию нечеткой модели выполняли также для физической модели, фото и функциональная схема которой показаны на рис. 6. Эта модель установки РГ включала в себя следующие элементы: синхронный генератор; машину постоянного тока, используемую в качестве первичного двигателя; возбудитель; преобразователь угловых перемещений; активно-индуктивную нагрузку. Скорость вращения ротора регулировали с помощью модели АРС в виде пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, реализованного с использованием блоков библиотек Real-Time Windows Target и Simulink системы MATLAB. Измерение скорости вращения ротора выполняли с помощью датчика угловых перемещений. Модель АРВ также выполнена в виде ПИД-регулятора. Связь между физической моделью и компьютером осуществляется через плату ввода-вывода типа PCI 6024E (рис. 7). Для управления физической моделью в системе MATLAB была собрана схема (рис. 8), где модели регуляторов (блоки ARS и ARE) получали сигналы действующих значений тока, напряжения и скорости вращения ротора с помощью блока Analog Input. Действующие значения тока и напряжения определяли с помощью стандартных блоков RMS. Сигналы регулирования через блок Analog Output поступали на источник питания машины постоянного тока (для регулирования скорости вращения ротора) и возбудитель синхронной машины (для регулирования напряжения генератора).

Регистрация экспериментальных данных выполнена с помощью блоков Scope при различных уставках и коэффициентах настройки регулятора скорости. Полученные при этом осциллограммы скорости вращения ротора генератора представлены на рис. 9.



а)



б)

Рис. 6. Фото (а) и функциональная схема (б) физической модели установки РГ: Т – турбина; ОВ – обмотка возбуждения; BR – датчик угловых перемещений

Fig. 6. Photo (a) and functional diagram (б) of the physical model of the RG installation: Т – turbine; ОВ – field winding; BR – angular displacement sensor



Рис. 7. Фото используемой платы ввода-вывода PCI 6024E

Fig. 7. Photo of the used PCI 6024E input-output board

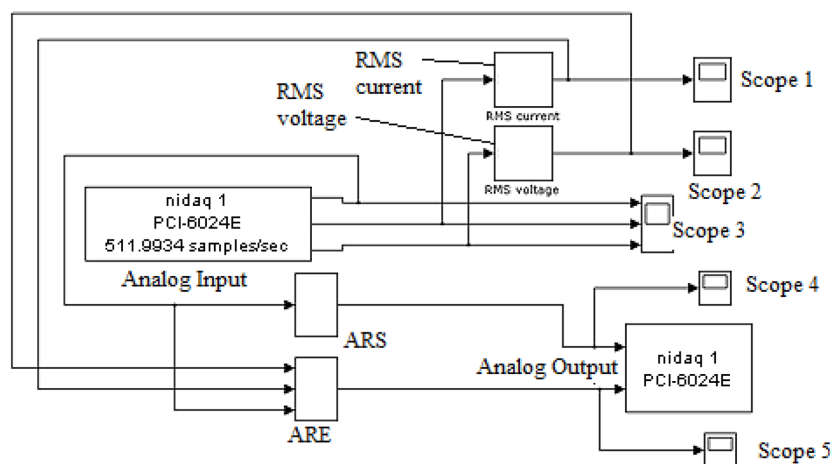


Рис. 8. Схема Simulink для управления физической моделью установки РГ

Fig. 8. Simulink scheme for controlling the physical model of the DG plant

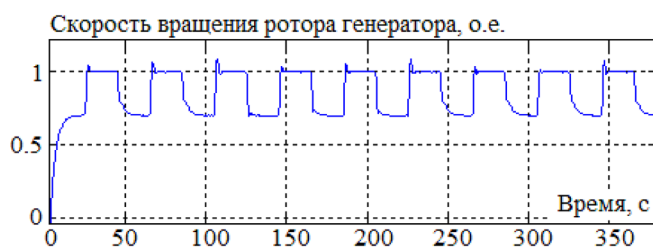


Рис. 9. Осциллограмма скорости вращения ротора генератора

Fig. 9. The oscillogram of the generator rotor speed

По полученным экспериментальным данным с помощью разработанной программы была построена и оптимизирована нечеткая модель регулирования скорости вращения ротора. Ее тестирование выполняли при случайных коэффициентах настройки регулятора (рис. 10). Результаты показали высокую точность (среднеквадратичное отклонение составило менее 0,008) и практическую пригодность разработанной программы для построения отдельных связей цифрового двойника установки РГ.

Таким образом, результаты исследований показали достаточно высокую эффективность использования нейронных сетей, системы нечеткого логического вывода и генетического алгоритма для построения цифровых моделей по экспериментальным данным. При этом применение генетического алгоритма позволяет оптимизировать параметры функций принадлежности.

## Заключение

Предложена структура цифрового двойника установки РГ, реализованной на основе синхронного генератора с нечетким блоком автонастройки АРВ и АРС, в виде иерархической модели, построенной с помощью экспериментальных данных.



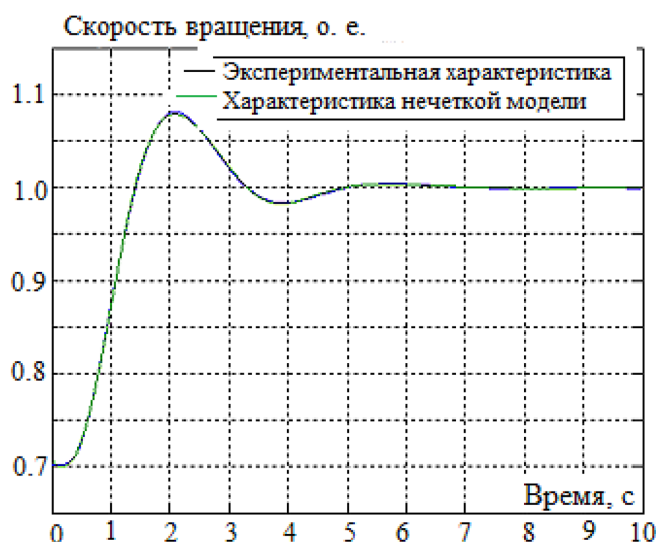


Рис. 10. Характеристики, полученные при тестировании нечеткой модели

Fig. 10. Characteristics obtained when testing a fuzzy model

На основе результатов расчета и моделирования можно сформулировать следующие выводы:

- представленные алгоритмы позволяют получать и оптимизировать функции принадлежности терм-множеств и количество правил нечеткой модели цифрового двойника установки РГ, построенной на основе экспериментальных данных;
- предложенные алгоритмы могут быть использованы при проведении дальнейших исследований, направленных на промышленную реализацию цифровых двойников установок РГ, а также для решения задачи настройки автоматических регуляторов синхронных генераторов малой мощности.

#### Список литературы / References

- [1] Morzhin Yu.I., Shakaryan Yu.G., Kucherov Yu.N. et al. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia. *Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011*. (GB: IEEE, The University of Manchester, 2011). Panel session 5D, 1–5.
- [2] Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries. *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586
- [3] Buchholz B.M., Styczynski Z.A. *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
- [4] Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2009, 3(2), 16-23.
- [5] Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Smart grid: effect of high harmonics on electricity consumers in distribution networks, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 841-845.



- [6] Adzic E., Ivanovic Z., Adzic M., Katic V. Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control, *Acta Polytechnica Hungarica*, 2009, 6(1), 131-149.
- [7] Voropai N.I., Stychinsky Z.A. *Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.
- [8] Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39, 748-764.
- [9] Magdi S. Mahmoud, Fouad M. AL-Sunni, *Control and Optimization of Distributed Generation Systems*, Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2015. 578 p.
- [10] Martínez Ceseña E.A., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty, *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2016, 7, 348-357.
- [11] Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation, *Far East Journal of Electronics and Communications*, 2017, 17(5), 1127-1140.
- [12] Yoshio Nishi Lithium ion secondary batteries; past 10 years and the future, *Journal of Power Sources*, 2001, 100, 101-106.
- [13] Lombardi P., Styczynski Z.A., Sokolnikova T., Suslov K. Use of energy storage in Isolated Micro Grids, *Power Systems Computation Conference (PSCC) 2014*, IEEE Conference Publications, 2014, 1-6. DOI: 10.1109/PSCC.2014.7038361.
- [14] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen Van Huan. Reduction in microgrids voltage dips based on power accumulators and controlled distributed generation plants, *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, IEEE Conference Publications, 2019, 24-28. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877687
- [15] Ерошенко С.А., Хальясмаа А.И. Технологии цифровых двойников в энергетике. *Электроэнергетика глазами молодежи*. В 3 т. Т. 1. Иркутск, 2019. С. 37-40 [Eroshenko S.A., Khalyasmaa A.I. Digital twin technology in the energy sector. *Electricity through the eyes of youth*. 2019. V. 1, 37-40 (in Russian)].
- [16] Jain P., Poon J., Singh J.P., Spanos C., Sanders S. and Panda S.K. A Digital Twin Approach for Fault Diagnosis in Distributed Photovoltaic System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35, 940-956.
- [17] Moussa C., Ai-Haddad K., Kedjar B. and Merkhoul A. Insights into Digital Twin Based on Finite Element Simulation of a Large Hydro Generator, *IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, 2018, 553-558.
- [18] Brosinsky C. et al. Recent and prospective developments in power system control centers: Adapting the digital twin technology for application in power system control centers, *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Limassol, 2018, 1-6.
- [19] Dufour C., Soghomonian Z. and Li W. Hardware-in-the-Loop Testing of Modern On-Board Power Systems Using Digital Twins, *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, 2018, 118-123.
- [20] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Neuro Fuzzy Control System for Distributed Generation Plants, *Proceedings of the Vth International workshop "Critical infrastructures: Contingency management*,

*Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security” (IWCI 2018)*, Atlantis Press, Advances in Intelligent Systems Research, 2018, 158, 13-19.

[21] Jang, J.-S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1993, 23, 665-685. DOI: 10.1109/21.256541

[22] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm, *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE Conference Publications, 2016, 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911456.

[23] Амосов О.С., Малашевская Е.А., Баена С.Г. Субоптимальное оценивание случайных последовательностей с использованием иерархических нечетких систем. *Интеллектуальные системы*, 2013, 3, 123-133 [Amosov O.S., Malashevskaya E.A., Baena S.G. Suboptimal estimation of random sequences using hierarchical fuzzy systems. *Intelligent systems*, 2013, 3, 123-133 (in Russian)].

[24] Yager R., Filev D., *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*, USA: John Wiley & Sons, 1984. p. 387.

[25] Нечеткая идентификация односвязных систем (FLI v. 1.00) / Булатов Ю.Н., Приходько М.А. Св. ГР №2011617041; зарег. в реестре программ для ЭВМ 12.09.11. (Федер. служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам) [Fuzzy identification of simply connected systems (FLI v. 1.00) / Bulatov Yu.N., Prikhodko M.A. Sv. GR №2011617041; zareg. v reestre programm dlya EVM 12.09.11. (Feder. sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0257

УДК 621.1

## Exergetic Analysis of Cogeneration Energy Sources

**Dmitriy R. Bibikov,  
Anton K. Poley and Alexander V. Kulik\***

*Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation*

Received 26.03.2020, received in revised form 17.04.2020, accepted 21.05.2020

**Abstract.** This article discusses the method of thermal and exergetic analysis of cogeneration energy sources on the example of the gas turbine unit LM6000PF (GTU-CHPP «Vostochnaya»). The purpose of the conducted exergetic analysis is to determine the most advantageous method for evaluating the performance of equipment in terms of thermodynamic efficiency. The comparison of GTU efficiency values obtained by calculation using the methods of thermal and exergetic analysis is performed. A special feature of the exergetic analysis is the use of an additional indicator as exergy along with energy indicator. In the analysis, the efficiency of using the energy of the fuel burned in the GTU combustion chamber and the working bodies of the gas cycle for the production of electrical and thermal energy is assessed by comparing the actually accomplished work with the exergy of the process.

**Keywords:** gas turbine unit, cogeneration, energy analysis, energy efficiency.

Citation: Bibikov D.R., Poley A.K., Kulik A.V. Exergetic analysis of cogeneration energy sources, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 690-701. DOI: 10.17516/1999-494X-0257

## Эксергетический анализ когенерационных энергоисточников

**Д.Р. Бибиков, А.К. Полей, А.В. Кулик**  
*Дальневосточный федеральный университет  
Российская Федерация, Владивосток*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрен метод теплового и эксергетического анализа работы когенерационных энергоисточников на примере газотурбинной установки LM6000PF (ГТУ-ТЭЦ «Восточная»). Целью проведенного эксергетического анализа служит определение наиболее выгодного с точки зрения термодинамической эффективности способа оценки работы оборудования. Выполнено сравнение величин КПД ГТУ, полученных расчетным путем по

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: bibikov\_dr@dvfu.ru, anton.poley@gmail.com, kulik\_av@dvfu.ru

методикам теплового и эксергетического анализа. Особенностью проведения эксергетического анализа является использование помимо энергии дополнительного показателя – эксергии. В ходе проведения эксергетического анализа оценивается эффективность использования энергии сжигаемого в камере сгорания ГТУ топлива и рабочих тел газового цикла для производства электрической и тепловой энергии путем сравнения фактически совершенной работы с эксергией процесса.

*Ключевые слова:* газотурбинная установка, когенерация, энергетический анализ, энергоэффективность.

Цитирование: Бибииков, Д.Р. Эксергетический анализ когенерационных энергоисточников / Д.Р. Бибииков, А.К. Полей, А.В. Кулик // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 690-701. DOI: 10.17516/1999-494X-0257

### Введение

Вопросы энергосбережения в нашей стране в связи с удорожанием всех видов топлива становятся чрезвычайно актуальными. Чтобы определить, где и в каком количестве можно уменьшить расход топлива, теплоты или электроэнергии, необходимо проводить тщательный анализ совершенства энергоиспользования на каждом энергетическом предприятии и в каждом его технологическом процессе. Существует прямая связь между уровнем анализа экономичности и достигнутыми технико-экономическими показателями тепловых электростанций. Исследование совершенства различных теплоиспользующих установок до настоящего времени проводится, как правило, посредством составления тепловых балансов, основанных на первом законе термодинамики – законе сохранения и превращения энергии, включающем в себя принцип эквивалентности различных видов энергии [1].

При составлении энергетических балансов тепловых электростанций и проведении их сопоставления все виды энергии выражают в эквивалентных энергетических величинах. Роль эквивалента выполняет энергия как количественная мера различных движений материи, а виды энергии, входящие в энергетический баланс, выражаются в Дж, ккал или кВт\*ч.

Развитие теплоэнергетики привело к такому усложнению тепловых схем, что их анализ с использованием только энергетических балансов стал недостаточным. Так, на тепловой электростанции в процессах преобразования исходной энергии топлива в электроэнергию участвуют такие виды энергии, как химическая энергия топлива, энергия потока тепла, энергия потока пара, механическая энергия и электрическая энергия, ценность которых с точки зрения возможности их практического использования различна.

Налагаемое вторым законом термодинамики ограничение на превратимость теплоты в работу позволяет во всех теплоэнергетических установках дополнительно составить баланс работоспособной энергии (эксергетический баланс) [2].

Поскольку энергетические процессы в любой термодинамической системе протекают в окружающей среде, параметры которой практически остаются неизменными, то, используя второе начало термодинамики, всегда можно определить максимальное количество работы, которое может быть полезно при данных условиях любым энергетическим потоком, и тем самым оценить его работоспособную часть, названную эксергией.

Эксергия – это максимальное количество работы, которое может быть получено при переходе термодинамической системы обратимым путем в состояние равновесия с окружающей средой. Этот термин ввел в термодинамику в 1955 г. югославский ученый зоран Рант,

чтобы разделить энергию на работоспособную и неработоспособную (анергию) части. Эксергия – это максимальное количество работы, которое может быть получено при переходе термодинамической системы обратимым путем в состояние равновесия с окружающей средой.

Эксергия характеризует энергию любого вида не только по ее количеству; она дает возможность количественно оценить и качественную ее сторону, т. е. она представляет собой некоторую универсальную меру энергетических ресурсов.

В связи с тем, что действительная выработка механической или электрической энергии в теплоэнергетической установке прямо пропорциональна использованной работоспособности, эксергетический баланс позволяет выявить не только очаги потерь, но и степень влияния каждой потери на общую выработку энергии и расход топлива. Эксергетический баланс, при сравнении его с тепловым, дает возможность рационально оценить параметры отдельных потоков циркулирующего рабочего тела, а также дать оценку распределению потерь в отдельных звеньях тепловой электростанции.

Увеличение доли газотурбинных установок (в балансе производства электрической энергии РФ), работающих в режиме когенерации, создает необходимость выявления различных подходов в определении энергоэффективности и учета потерь энергии. Суммарные затраты топлива при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии (когенерации) значительно ниже, чем при их раздельном производстве, но просто вычленив расходы топлива на каждый вид продукции невозможно. В настоящее время Министерством энергетики РФ для распределения затрат топлива ГТУ рекомендован пропорциональный метод распределения затрат, но это не означает, что другие способы не могут применяться на ТЭЦ, в том числе для определения анализа работы ГТУ и повышения энергоэффективности установок [3].

### Эксергетический и тепловой расчет ГТУ LM

Эксергетический анализ работы ГТУ направлен на определение степени термодинамического совершенства получения полезной работы в ГТУ простого газового цикла с учетом различных температур наружного воздуха из диапазона минус 30...30 °С.

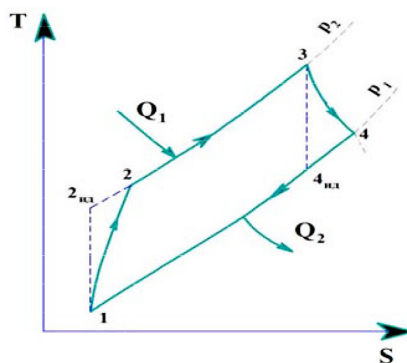


Рис. 1. Цикл Брайтона ГТУ при отсутствии промежуточного охлаждения циклового воздуха

Fig. 1. GTU Brighton cycle in the absence of intermediate cooling of cyclic air

На рис. 1 представлен простой цикл Брайтона газотурбинной установки (без использования промежуточного охлаждения сжимаемого циклового воздуха) [4] со следующими обозначениями процессов: 1-2 – сжатие воздуха в турбокомпрессоре ГТУ; 2-3 – подвод теплоты к циклу в камере сгорания ГТУ; 3-4 – расширение газов в турбине ГТУ; 4-1 – отвод теплоты из цикла.

Точка 1. Состоянию воздуха перед турбокомпрессором ГТУ соответствуют параметры окружающей среды: давление –  $P_1 = 0,1$  МПа; температура –  $t_1$ , энтальпия –  $h_1$ , энтропия –  $s_1$ , специальная функция адиабатного процесса –  $\pi_1$ .

Точка 2(ид). Давление циклового воздуха после турбокомпрессора ГТУ определяется степенью повышения давления воздуха:

$$p_2 = p_1 * \pi_{mk}. \quad (1)$$

Для нахождения свойств воздуха в конце обратимого (адиабатного) процесса сжатия (точка 2 ид) необходимо определить значение функции  $\pi_2$ .

$$\pi_{mk} = \pi_1 * \frac{p_2}{p_1}. \quad (2)$$

По найденному значению  $\pi_2$  определяются остальные свойства воздуха после адиабатного процесса сжатия в турбокомпрессоре ГТУ: температура –  $t_{2\text{ид}}$ , энтальпия –  $h_{2\text{ид}}$ , энтропия –  $s_{2\text{ид}} = s_1$ .

Точка 2. Энтальпия воздуха в конце необратимого процесса сжатия в турбокомпрессоре ГТУ:

$$h_2 = h_1 + [(h_{2\text{ид}} - h_1) / \eta_{0i}^{TK}], \quad (3)$$

где  $\eta_{0i}^{TK} = 0,88$  – КПД турбокомпрессора.

По полученной величине энтальпии определяют значения температуры  $t_2$  и энтропии  $s_2'$ . Уточненное значение энтропии в конце реального процесса сжатия находим с учетом универсальной газовой постоянной  $R = 0,287$  (кДж/кг · К):

$$s_2 = s_2' - [R * \ln -(p_2 / p_1)]. \quad (4)$$

Точка 3. По начальной температуре газов ( $t_3 = 1250$  – для General Electric LM6000PF) определяются параметры газов перед газовой турбиной: энтальпия –  $h_3$ , энтропия –  $s_3^0$ , функция –  $\pi_3$ . Уточненное значение энтропии газов перед турбиной:

$$s_3 = s_3^0 - [R * \ln -(p_2 / p_1)]. \quad (5)$$

Точка 4(ид). Для определения термодинамических свойств газов после «идеального» процесса расширения в газовой турбине необходимо определить функцию адиабатного процесса  $\pi_4$ :

$$\pi_4 = \pi_3 * (p_1 / p_2). \quad (6)$$

После этого определяют остальные свойства газов в данной точке: температура –  $t_4$ , энтальпия –  $h_{4\text{ид}}$ . Энтропия газов:

$$s_{4\text{ид}} = s_3. \quad (7)$$

Точка 4. Энтальпия газов в конце действительного процесса расширения в турбине определяется по формуле

$$h_4 = h_3 - [(h_3 - h_{4\text{ид}})/\eta_{0i}^{TT}], \quad (8)$$

где  $\eta_{0i}^{TT} = 0,87$  – КПД газовой турбины.

По полученному значению энтальпии определяют температуру  $t_4$  и энтропию  $s_4$  газов в конце «реального» процесса расширения в турбине.

Определение термодинамических свойств рабочего тела ГТУ в характерных «точках» газотурбинного цикла позволяет вычислить удельную работу газовой турбины и турбокомпрессора ГТУ, а также термический и полный КПД газотурбинной установки. Значения удельной работы турбокомпрессора ( $l_{mk\text{ид}}$ ) и газовой турбины ( $l_{zm\text{ид}}$ ) ГТУ с учетом идеальных процессов сжатия и расширения рабочего тела установки вычисляют через разницу энтальпий:

$$l_{mk\text{ид}} = h_{2\text{ид}} - h_1, \quad (9)$$

$$l_{zm\text{ид}} = h_3 - h_{4\text{ид}}. \quad (10)$$

Значения удельной работы турбокомпрессора ( $l_{mk}$ ) и газовой турбины ( $l_{zm}$ ) ГТУ с учетом необратимости процессов сжатия и расширения рабочего тела газотурбинного цикла:

$$l_{mk} = h_2 - h_1, \quad (11)$$

$$l_{zm} = h_3 - h_4. \quad (12)$$

Термический КПД газотурбинного цикла характеризует степень совершенства ГТУ:

$$\eta_t = \frac{l_{zm} - l_{mk}}{q_1}, \quad (13)$$

где  $q_1 = h_3 - h_2$  – количество теплоты, подведенной в камеру сгорания ГТУ.

Общий КПД газотурбинной установки вычисляется по формуле

$$\eta_{cmy} = \frac{l_{zm} * \eta_{\text{м}} + l_{mk} * \eta_{\text{эг}}}{q_1 * \eta_{\text{кс}}}, \quad (14)$$

где  $\eta_{\text{кс}}$ ,  $\eta_{\text{эг}}$ ,  $\eta_{\text{м}}$  – КПД камеры сгорания, электрогенератора, вала ГТУ.

На мощность ГТУ оказывают влияние значения удельной работы турбокомпрессора и газовой турбины ГТУ, а также объемные расходы циклового воздуха и нагретых до высокой температуры газов:

$$N_{cmy} = [G_c * (h_3 - h_4)] + [G_g * (h_2 - h_1)], \quad (15)$$

где  $G_g$  – расход циклового воздуха,  $G_c$  – расход газов ГТУ.

Расход газов складывается из расходов циклового воздуха и топлива:

$$G_g = G_c + B_m. \quad (16)$$

Расход топлива, подаваемого в камеру сгорания ГТУ, вычисляем с учетом его теплоты сгорания ( $Q_n^p$ ), мощности ( $N_{cmy}$ ) и КПД ( $\eta_{cmy}$ ) установки:



$$B_m = \frac{N_{zmy}}{\eta_{zmy} * Q_n^p}. \quad (17)$$

Влияние температуры ( $t_{нв}$ ) наружного воздуха на экономичность ГТУ проявляется зависимостью температуры ( $t_{гт}^* = t_4$ ) газов после газовой турбины от  $t_{нв}$ :

$$t_4^* = k * t_4, \quad (18)$$

где  $k = 1,023 - [0,0006571 * (50 - t_4)]$  – коэффициент пересчета температуры газов после газовой турбины с учетом стандартной ( $t_{нв} = +15^\circ\text{C}$ ) и текущей температуры наружного воздуха. Расчеты проводились при постоянной температуре газов перед турбиной =  $1250^\circ\text{C}$ .

На рис. 2 показано влияние температуры наружного воздуха на значения термического эксергетического КПД ГТУ, которые определялись по формуле 30 (см. ниже по тексту) [5].

Для определения полноты использования эксергии топлива в цикле ГТУ необходимо определить эксергетические КПД основных элементов газотурбинной установки – турбокомпрессора, газовой турбины и камеры сгорания и потери эксергии в них. Эксергия рабочего тела (сжимаемый воздух / газы) ГТУ в каждой характерной точке газового цикла определяется по формуле

$$e_i = h_i - h_{нв} - [(t_{нв} + 273) * (s_i - s_{нв})], \quad (19)$$

где  $h_i$  и  $s_i$  – энтальпия и энтропия рабочего тела ГТУ;  $t_{нв}$ ,  $h_{нв}$ ,  $s_{нв}$  – температура, энтальпия и энтропия наружного воздуха.

На эксергию топлива ( $e_{топл}$ ) оказывает влияние удельное количество теплоты, подведенной в камеру сгорания ГТУ, относительно низшей теплоты сгорания топлива  $Q_n^p$  (параметр  $m_{тепл}$ ):

$$m_{тепл} = \frac{q_1}{Q_n^p * \eta_{кс}}, \quad (20)$$

$$e_{топл} = m_{тепл} * Q_n^p = \frac{Q_n^p * q_1}{Q_n^p * \eta_{кс}} = \frac{q_1}{\eta_{кс}} \sim q_1. \quad (21)$$

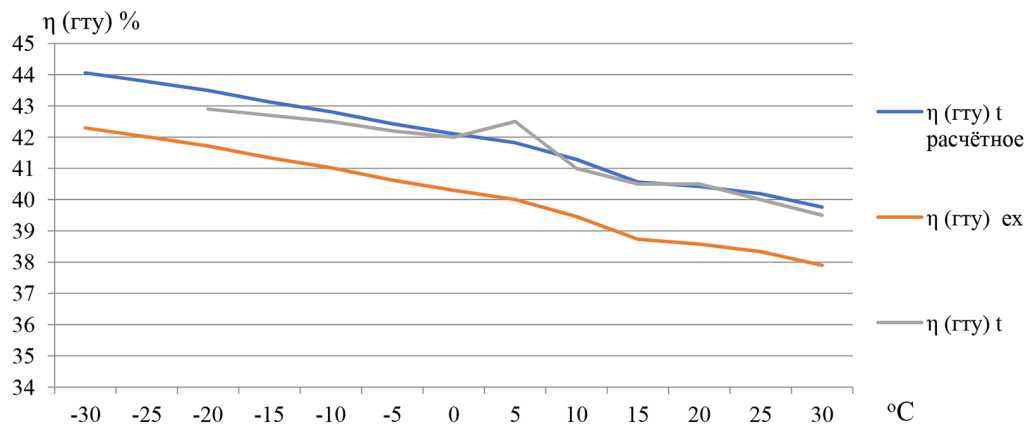


Рис. 2. Зависимость термического и эксергетического КПД ГТУ от значений  $t_{нв}$

Fig. 2. The dependence of thermal and exergy efficiency of gas turbines on the values  $t_{нв}$

Потери эксергии в камере сгорания ( $\Delta e_{\text{КС}}$ ), турбокомпрессоре ( $\Delta e_{\text{ТК}}$ ) и газовой турбине ( $\Delta e_{\text{ГТ}}$ ) ГТУ, станавливают по формулам [6]:

$$\Delta e_{\text{КС}} = e_{\text{топл}} - (e_3 - e_2), \quad (22)$$

$$\Delta e_{\text{ТК}} = l_{\text{ТК}} - (e_2 - e_1), \quad (23)$$

$$\Delta e_{\text{ГТ}} = (e_2 - e_1) - l_{\text{ГТ}}. \quad (24)$$

Кроме того, необходимо учесть потери эксергии на трение в подшипниках и в электрическом генераторе:

$$\Delta e_{\text{МГ}} = [(1 - \eta_{\text{М}}) * l_{\text{ГТ}}] + [(1 - \eta_{\text{ЭГ}}) * (l_{\text{ГТ}} * \eta_{\text{М}} - l_{\text{ТК}})], \quad (25)$$

где  $\eta_{\text{М}} = 0,985$  – механический КПД;  $\eta_{\text{ЭГ}} = 0,99$  – КПД электрогенератора.

Потери эксергии с уходящими газами ГТУ оценивают потери теплоты от газов в окружающей среде:

$$\Delta e_{\text{уход.с}} = e_4 - e_1. \quad (26)$$

Снижение температуры наружного воздуха обуславливает возрастание указанных потерь. Эксергетические КПД основных элементов ГТУ – камеры сгорания ( $\eta_{\text{КС}}^{\text{ex}}$ ), турбокомпрессора ( $\eta_{\text{ТК}}^{\text{ex}}$ ) и газовой турбины ( $\eta_{\text{ГТ}}^{\text{ex}}$ ) – определяют по формулам [7]:

$$\eta_{\text{КС}}^{\text{ex}} = 1 - \left( \frac{\Delta e_{\text{КС}}}{\Delta e_{\text{топл}}} \right), \quad (27)$$

$$\eta_{\text{ТК}}^{\text{ex}} = 1 - \left( \frac{\Delta e_{\text{ТК}}}{l_{\text{ТК}}} \right), \quad (28)$$

$$\eta_{\text{ГТ}}^{\text{ex}} = 1 - (\Delta e_{\text{ГТ}} / l_{\text{ГТ}}). \quad (29)$$

С понижением температуры наружного воздуха происходит увеличение потерь эксергии в камере сгорания ГТУ, в то же время потери и снижаются. Однако потери эксергии в турбокомпрессоре и в газовой турбине малы и влияют на эксергетический КПД установки в незначительной степени. Поэтому эксергетические КПД турбокомпрессора и газовой турбины ГТУ достигают высоких значений и составляют  $\eta_{\text{ТК}}^{\text{ex}} = 93,95...94,23$  % и  $\eta_{\text{ГТ}}^{\text{ex}} = 94,41...95,46$  %.

Потери эксергии в основных элементах газотурбинной установки позволяют оценить степень совершенства газотурбинного цикла. Эксергетический КПД газотурбинной установки определяют с учетом эксергии топлива и всех составляющих потерь эксергии в газовом цикле:

$$\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{ex}} = 1 - \frac{\sum \Delta e}{e_{\text{топл}}} = \frac{\Delta e_{\text{КС}} * \Delta e_{\text{ТК}} * \Delta e_{\text{ГТ}} * \Delta e_{\text{уход.с}} * \Delta e_{\text{МГ}}}{e_{\text{топл}}}. \quad (30)$$

Таким образом, установлено, что при снижении температуры наружного воздуха суммарные потери эксергии возрастают, в то же время происходит повышение эксергии топлива, благодаря чему эксергетический КПД газотурбинной установки возрастает.

Результаты теплового и эксергетического анализов работы ГТУ GE LM6000PF приведены в табл. 1 и 2 [8].

Таблица 1. Тепловой анализ работы ГТУ General Electric LM6000 при различных значениях температуры наружного воздуха  $t_{нв}$

Table 1. Thermal analysis work GTU General Electric LM6000 at various outdoor temperatures  $t_{нв}$

t нв	°C	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
t (1)	°C	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
h (1)	кДж/кг	243,24	248,25	253,26	258,28	263,29	268,31	273,32	278,34	283,35	288,37	293,39	298,41	303,43
s (1)	кДж/(кг·К)	6,4928	6,5141	6,5341	6,5537	6,5729	6,5918	6,6103	6,6285	1,1323	6,664	6,6812	6,6982	6,7149
π (1)	-	0,6701	0,7141	0,7657	0,8198	0,8766	0,9362	0,9986	1,064	1,1323	1,2038	1,2784	1,3563	1,4375
e (1)	кДж/кг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t (2)	°C	418	432	445	458	471	485	498	510	525	543	552	563	575
h (2)	кДж/кг	704,979	718,76	732,61	747,69	761,61	776,59	790,35	803,42	820,13	839,18	849,64	861,34	875,58
s (2)	кДж/(кг·К)	6,5847	6,6049	6,6255	6,6453	6,6644	6,6846	6,7032	6,72	6,7415	6,7654	6,7775	6,7921	6,8085
π (2)	-	20,7731	22,137	23,737	25,414	27,175	29,022	30,957	32,984	35,101	37,318	39,63	42,045	44,563
e (2)	кДж/кг	439,407	447,99	456,23	465,78	474,25	483,41	491,67	499,64	509,87	521,6	528,03	534,95	543,79
t (3)	°C	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276
h (3)	кДж/кг	1695,98	1696	1696	1696	1696	1696	1696	1696	1696	1696	1696	1696	1696
s (3)	кДж/(кг·К)	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51
π (3)	-	689,15	689,15	689,15	689,15	689,15	689,15	689,15	689,15	689,15	689,15	689,15	689,15	689,15
e (3)	кДж/кг	1205,56	1200,7	1195,8	1191	1186,2	1181,6	1177	1172,6	1168,2	1164	1159,8	1155,7	1151,6
t (4)	°C	504	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440
h (4)	кДж/кг	797,6	797,6	797,6	797,6	797,6	797,6	797,6	797,6	797,6	797,6	797,6	797,6	797,6
s (4)	кДж/(кг·К)	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68
π (4)	-	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23
e (4)	кДж/кг	265,88	260,22	254,44	248,74	243,15	237,66	232,26	226,95	221,75	216,63	211,57	206,62	201,75
Лтк	кДж/кг	461,7	470,5	479,4	489,4	498,3	508,3	517	525,1	536,8	550,8	556,3	562,9	572,1
Лгт	кДж/кг	898,4	898,4	898,4	898,4	898,4	898,4	898,4	898,4	898,4	898,4	898,4	898,4	898,4
η (гту) t	%	0,441	0,438	0,435	0,431	0,428	0,424	0,421	0,418	0,413	0,406	0,404	0,402	0,398

Таблица 2. Эксергетический анализ работы ГТУ General Electric LM6000 при различных значениях температуры наружного воздуха  $t_{нв}$   
 Table 2. Exergy work analysis GTU General Electric LM6000 at various outdoor temperatures  $t_{нв}$

$t_{нв}$	$^{\circ}\text{C}$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
$m$ (топл)	--	0,028	0,02	0,02	0,019	0,019	0,019	0,019	0,018	0,018	0,018	0,017	0,017	0,017
$e$ (топл)	кДж/кг	1001	987,1	973,1	957,9	943,8	928,7	914,8	901,6	884,7	865,5	854,9	843,1	828,7
$\Delta e$ (кк)	кДж/кг	234,9	234,3	233,5	232,7	231,8	230,5	229,4	228,6	226,3	223,1	223,2	222,4	220,8
$\eta$ (кк)	%	0,765	0,763	0,76	0,757	0,754	0,752	0,749	0,746	0,744	0,742	0,739	0,736	0,734
$\Delta e$ (тк)	кДж/кг	22,33	22,52	23,12	23,63	24,06	24,87	25,36	25,44	26,91	29,2	28,22	27,98	28,36
$\eta$ (тк)	%	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,951	0,951	0,952	0,95	0,947	0,949	0,95	0,95
$\Delta e$ (гт)	кДж/кг	41,31	42,16	43,01	43,86	44,71	45,56	46,41	47,26	48,11	48,96	49,81	50,66	51,51
$\eta$ (гт)	%	0,956	0,955	0,954	0,953	0,953	0,952	0,951	0,95	0,949	0,948	0,947	0,947	0,946
$\Delta e$ (у.г.)	кДж/кг	265,9	260,2	254,4	248,7	243,2	237,7	232,3	227	221,8	216,6	211,6	206,6	201,8
$\Delta e$ (мг)	кДж/кг	13,26	13,17	13,08	12,98	12,89	12,79	12,71	12,63	12,51	12,37	12,32	12,25	12,16
$\eta$ (г) ex	%	0,57	0,568	0,567	0,564	0,562	0,559	0,556	0,555	0,549	0,541	0,542	0,54	0,537
$\Sigma \Delta e$	кДж/кг	577,6	572,4	567,2	561,9	556,7	551,4	546,1	540,9	535,6	530,3	525,1	519,9	514,6
$\eta$ (ггу) ex	%	0,423	0,42	0,417	0,413	0,41	0,406	0,403	0,4	0,395	0,387	0,386	0,383	0,379

### Эксергетический расчет котла утилизатора

Для определения потерь эксергии с уходящими газами ГТУ (после котла-утилизатора) необходимо определить удельное количество теплоты, подводимой к пароводяному тракту котла-утилизатора [9]:

$$\Delta Q_{\text{вода}} = \frac{h_1 - h_4}{\eta_{\text{ку}}}, \quad (31)$$

где  $h_1 - h_4$  – значения энтальпии воды на выходе и входе в котел утилизатор;  $\eta_{\text{ку}}$  – КПД котла утилизатора [7].

Удельный расход газов ГТУ относительно расхода сетевой воды:

$$g = \frac{h_1 - h_4}{\eta_{\text{ку}} * (h_{\text{ГТ}}'' - h_{\text{НВ}})}, \quad (32)$$

где  $h_{\text{ГТ}}''$  – энтальпия уходящих газов газовой турбины, которая определяется по температуре  $t_{\text{ГТ}}''$  и коэффициенту избытка воздуха  $\alpha$ .

Эксергию уходящих газов ГТУ перед котлом-утилизатором вычисляем по формуле

$$e_{\text{ГТ}}'' = e_{\text{ку}}'' = h_{\text{ГТ}}'' - h_{0(\text{В})} - [(t_{\text{НВ}} + 273) * (s_{\text{ГТ}}'' - s_{0(\text{В})})]. \quad (33)$$

В данной формуле  $s_{\text{ГТ}}''$  – энтропия газов после газовой турбины.

Потери эксергии с уходящими газами ГТУ характеризуют безвозвратную потерю эксергии рабочего тела ГТУ, отводимого из цикла

$$\Delta e_{\text{газы}} = \Delta q_{\text{воды}} - e_{\text{ГТ}}''. \quad (34)$$

Потери эксергии вследствие необратимости теплообмена между газами ГТУ и рабочим телом (вода) в котле-утилизаторе определяют по формуле

$$\Delta e_{\text{Т/О}} = e_{\text{ГТ}}'' - (e_1 - e_4), \quad (35)$$

где  $e_1$  – эксергия подогретой воды в котле-утилизаторе;  $e_4$  – эксергия сетевой воды на входе в КУ.

Общие потери эксергии в котле-утилизаторе складываются из потерь с уходящими газами ГТУ и потерь, связанных с необратимостью процесса передачи теплоты от газов к воде:

$$\Delta e_{\text{ку}} = \Delta e_{\text{газы}} + \Delta e_{\text{Т/О}}. \quad (36)$$

Эксергетический КПД котла-утилизатора характеризует степень полезного использования тепловой энергии газов в его водяном тракте [10]:

$$\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}} = 1 - \frac{\Delta e_{\text{ку}}}{\Delta Q_{\text{вода}}}. \quad (37)$$

Энтальпию газов на выходе из котла-утилизатора вычисляем по формуле

$$h_{\text{ку}}'' = h_{\text{ГТ}}'' - [(h_1 - h_4) / g]. \quad (38)$$

По данной энтальпии газов и по параметрам состояния наружного воздуха ( $t_{\text{НВ}}$ ,  $h_{\text{НВ}}$ ,  $s_{\text{НВ}}$ ) определяется энтропия  $s_{\text{ку}}''$ , что позволяет рассчитать эксергию газов на выходе из котла-утилизатора:

$$e_{\text{ку}}'' = h_{\text{ГТ}}'' - h_{\text{НВ}} - [(t_{\text{НВ}} + 273) * (s_{\text{ку}}'' - s_{\text{НВ}})] - h_4) / g]. \quad (39)$$

Таблица 3. Эксергетический анализ работы КУВ – 46,5 – 140, работающего совместно с General Electric LM6000 при различных значениях температуры наружного воздуха  $t_{нв}$

Table 3. Exergy work analysis boiler – 46,5 – 140 working with General Electric LM6000 at various outdoor temperatures  $t_{нв}$  [11]

$t_{нв}$	°C	Минус 30	Минус 20	Минус 10	0	10	20	30
h нв	кДж/кг	243,24	253,26	263,29	273,32	283,35	293,39	303,43
s нв	кДж/(кг·К)	6,49	6,53	6,57	6,61	6,65	6,68	6,71
e (0)	кДж/кг	1104,5	1037,6	970,78	903,93	837,45	792,14	708,15
e (4)	кДж/кг	132,64	128,63	124,62	120,62	116,98	134,5	113,35
e (4) д	кДж/кг	174,59	170,48	166,38	162,27	158,53	175,96	154,71
e (" гт)	кДж/кг	1651,8	1607,2	1566,1	1528,7	1495,2	1445,7	1398,4
Δe (сг)	кДж/кг	1805,2	1849,8	1890,9	1928,3	1961,8	2011,3	2058,6
Δe (теп)	кДж/кг	1004,2	959,64	918,53	881,12	847,64	798,17	750,88
Δe (ку)	кДж/кг	2809,4	2809,4	2809,4	2809,4	2809,4	2809,4	2809,4
КПД КУ	%	0,1873	0,1873	0,1873	0,1873	0,1873	0,1873	0,1873
h (у.г.)	кДж/кг	440,11	447,22	454,35	461,47	468,59	475,72	482,85
e (у.г.)	кДж/кг	530,26	556,27	583,25	611,27	640,37	651,89	654,32

Результаты эксергетического анализа работы КУ совместно GE LM6000PF приведены в табл. 3 [8].

### Заключение

Эксергетический метод оценки энергоэффективности ГТУ позволяет более детально оценить потери ГТУ. Эксергетический анализ дает возможность выявить наиболее слабые элементы теплосиловой установки с позиций энергоэффективности и определить меры и конструкторские решения по повышению их термодинамического совершенства. Эксергетический анализ учитывает потери от неравновесности процессов в термодинамической системе при заданных условиях окружающей среды. Поэтому он позволяет проводить как относительную (определение эксергетического КПД), так и абсолютную (определение теплового КПД) степень термодинамического совершенства оборудования по сравнению с анализом, основанным на энергетическом. Таким образом, эксергетический анализ дополняет энергетический анализ, который основан на составлении балансов энергии. Достоинством эксергетического анализа является возможность оценивать степень совершенства процессов передачи и полезного использования энергии путем сравнения разности эксергии на входе и выходе элемента установки (турбокомпрессор, газовая турбина, камера сгорания, котел-утилизатор, паровая турбина и др.). К примеру, при оценке эффективности работы ГТУ и котла-утилизатора эксергетическим методом учитывается организация процессов использования химической энергии сжигаемого в камере сгорания ГТУ топлива и передачи теплоты воде, в то время как при энергетическом (тепловом) анализе котел-утилизатор рассматривается в качестве простого теплообменника.

### Список литературы

[1] Ипатов В.Б. Эксергетический анализ технико-экономических показателей тепловой электростанции: Технический отчет / Дальтехэнерго; Владивосток, 1994 – 57 с. [Ipatov V.B.

Exergetic analysis of technical and economic indicators of a thermal power plant: *Technical report / Daltehenergo; Vladivostok* (rus)].

[2] Штым А.Н., Ипатов В.Б. Эксергетический анализ основного оборудования ТЭС // Тез. докл. НТК ДВГТУ «Вологдинские чтения», 24-27 ноября 1998 г. Владивосток, 1998. С. 36. [Shtym A.N., Ipatov V.B. Exergetic analysis of the main equipment of TPP/ *Abstract report NTK DVGTU «Vologdinskiy's reading»* (rus)]

[3] Минэнерго России. Приказ от 30.12.2008 № 323 (ред. от 30.11.2015) Об утверждении порядка определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902148460> – [Ministry of Energy of Russia. Order dated 30.12.2008 No. 323 (as revised from 30.11.2015) On approval of the procedure for determining the standards for specific fuel consumption in the production of electrical and thermal energy [Electronic resource] – Access: <http://docs.cntd.ru/document/902148460> (rus)]

[4] Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. М.: Издательский дом МЭИ, 2004. 158 с. [Aleksandrov A.A. Thermodynamic foundations of cycles of thermal power plants, Publishing House MEI, 2004, 158 p. (rus)]

[5] Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 164 с. [Aleksandrov A.A., Grigoryev B.A. Tables of thermophysical properties of water and steam, Publishing House MEI 2006, 164 p. (rus)]

[6] Андриященко А.И., Ларин Е.А., Сандалова Л.А. Метод эксергетического анализа термодинамических систем и комплексов. Саратовский государственный технический университет, 2008. 74 с. [Andryshenko A.I., Larin E.A., Sandalova L.A. The method of exergy analysis of thermodynamic systems and complexes. SSTU, 2008, 74 p. (rus)]

[7] Андриященко А.И., Аминов Р.З. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций. М.: Высшая школа, 1983. 255 с. [Andryshenko A.I., Aminov R.Z. Optimization of operating modes and parameters of thermal power plants, Hight school, 1983, 255 p. (rus)]

[8] Андриященко, А.И., Николаев Ю.Е. Экологическая и экономическая эффективность замены устаревшего паротурбинного оборудования ТЭЦ на газотурбинное и парогазовое. Промышленная энергетика. 2006, № 7, с. 2-6 [Andryshenko A.I., Nikolaev U.E. Environmental and economic efficiency of replacing obsolete steam turbine equipment of CHP plants with gas turbine and combined cycle equipment. *Industrial energy*, 2006, 7, 2-6. (rus)]

[9] Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. Л.: Машиностроение, 1982. 247 с. [Arseniyev L.V., Tyryshkin V.G. Combined units with gas turbines. Mechanical engineering, 1982, 247 p. (rus)]

[10] Байгалиев Б.Е., Щелчков А.В., Яковлев А.Б., Гортышов П.Ю. Теплообменные аппараты. Казанский государственный энергетический университет, 2012, 180 с. [Baygaliev B.E., Chelchkov A.B., Yakovlev A.B., Gortyshov P.U. Heat exchangers. KSEU, 2012, 180 p. (rus)]

[11] Барочкин Е.В., Жуков В.П., Борисов А.А., Ледуховский Г.В. Повышение эффективности работы ТЭЦ на основе оптимизации распределения сетевой воды. *Энергетик. №10*. 2012. С. 13-15. [Barochkin E.V., Zhukov V.P., Borisov A.A., Leduhovskiy G.V. Improving the efficiency of the CHP plant based on the optimization of the distribution of network water. *Energetik №10*, 2012, p. 13-15 (rus)]



DOI: 10.17516/1999-494X-0259

УДК 620.91

## **Risk Assessment of Renewable Energy Generation Systems Projects**

**Vladimir A. Tremyasov,  
Yana E. Zograf\* and Tatyana V. Krivenko**  
*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 22.03.2020, received in revised form 21.04.2020, accepted 21.05.2020

**Abstract.** The operation of renewable energy generation systems is associated with various risks. Risk analysis is part of a systematic approach to making technical decisions to prevent or reduce the risk of industrial accidents, damage to property and the environment. When evaluating the effectiveness of investment projects with renewable energy sources, risk assessment is carried out with uncertainty of information about the conditions of project implementation, including associated costs and economic losses. This article proposes a quantitative risk assessment method using cause – consequence diagrams, which are combined event trees and fault trees, on the example of the wind power installation NordWind (Germany).

**Keywords:** renewable energy generation systems, wind power installation, risk assessment, uncertainty, event tree, fault tree, reliability, cause – consequence diagram, economic losses.

Citation: Tremyasov V.A., Zograf Ya.E., Krivenko T.V. Risk assessment of renewable energy generation systems projects, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 702-711. DOI: 10.17516/1999-494X-0259

## **Оценка рисков проектов систем генерации с возобновляемыми источниками энергии**

**В.А. Тремясов, Я.Е. Зограф, Т.В. Кривенко**  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Анализ риска систем генерации с возобновляемыми источниками энергии является частью системного подхода к принятию технических решений по предупреждению опасности техногенных аварий, ущерба оборудованию и окружающей среде. При оценке эффективности

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: ezhaky@mail.ru

инвестиционных проектов с возобновляемыми источниками энергии учет рисков производится при неопределенности информации об условиях реализации проекта, в том числе связанных с ними затрат и экономических потерь. В статье предложена количественная методика оценки риска с использованием диаграмм «причина–последствие», представляющих собой комбинацию деревьев событий и деревьев отказов, на примере ветроэнергетической установки NordWind (Германия).

*Ключевые слова:* системы генерации с возобновляемыми источниками энергии, ветроэнергетическая установка, оценка риска, неопределенность, дерево событий, дерево отказов, надежность, диаграмма «причина–последствие», экономические потери.

Цитирование: Тремясов, В.А. Оценка рисков проектов систем генерации с возобновляемыми источниками энергии / В.А. Тремясов, Я.Е. Зограф, Т.В. Кривенко // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 702-711. DOI: 10.17516/1999-494X-0259

## Введение

Риски, связанные с эксплуатацией систем генерации с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), можно условно разделить на две категории:

1. Риски, связанные с зависимостью выработки электрической энергии от метеорологических и климатических факторов. Для ветроэнергетических установок (ВЭУ) это отсутствие ветра в период пикового потребления, для солнечной энергетики – облачность и прочие метеорологические факторы. Производительность малых гидроэлектростанций (МГЭС) может снижаться в период засухи летом, а в зимних условиях эксплуатация МГЭС в определенный период времени не представляется возможной. Всем указанным системам генерации ВИЭ требуется резервный источник питания. Эту функцию может взять на себя существующая дизельная электростанция или когенерационная установка.

2. Риски, связанные с выходом из строя отдельных элементов и узлов генерирующего объекта. Современные ВИЭ представляют собой сложные системы, состоящие из множества взаимодействующих друг с другом разнородных элементов, число которых может достигать нескольких тысяч. Вместе с тем ужесточаются требования к эффективности функционирования и качеству производимых ВИЭ. Во многом это связано с риском возникновения опасностей и аварий при эксплуатации таких систем.

Моделирование сложных установок ВИЭ в децентрализованных энергосистемах позволяет исследовать особенности их функционирования в различных условиях, наделять их требуемыми характеристиками и снижать риск возникновения чрезвычайных ситуаций.

Анализ риска является частью системного подхода к принятию технических решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности техногенных аварий для жизни человека, ущерба имуществу и окружающей среде, называемого в нашей стране обеспечением промышленной безопасности, а за рубежом – управлением риском (хеджированием) [1].

Оценку эффективности инвестиционных проектов с ВИЭ необходимо производить с учетом рисков в условиях неопределенности. Под неопределенностью понимается неполнота или нечеткость информации об условиях реализации проекта, в том числе связанных с ними затрат.

При оценке проектов с ВИЭ наиболее существенными представляются следующие виды неопределенности и, соответственно, инвестиционных рисков:

- неопределенность природно-климатических условий, возможность стихийных бедствий;
- неполнота или неточность информации о динамике технико-экономических показателей, параметрах новой техники и технологии;
- производственно-технологический риск (аварии и отказы оборудования, снижение качества производимой электроэнергии и т. п.);
- риск, связанный с нестабильностью текущей экономической ситуации и условий инвестирования;
- внешнеэкономический риск (возможность введения ограничений на торговлю и поставки оборудования, закрытие границ и т.п.).

Расчет рисков возможен путем оценки ожидаемого эффекта проекта с учетом количественных характеристик неопределенности. Рассматриваются все возможные прибыльные и убыточные сценарии реализации проекта и оценивается эффективность с учетом вероятности их возникновения.

В табл. 1 приведены виды ключевых рисков систем генерации с ВИЭ и предложения по управлению рисками.

В табл. 2 приведены результаты исследований, описанные в работе [2]. Они показывают, что потребление природного газа и ядерной энергии – традиционных видов топлива, используемых для производства электроэнергии, – существенно меньше связано с риском, чем другие способы получения электроэнергии, в том числе с применением ВИЭ.

Таблица 1. Ключевые риски систем генерации с ВИЭ

Table 1. Key risks of renewable energy generation systems

Тип генерации ВИЭ	Ключевые риски	Предложения по управлению рисками
Ветроэнергетика	Длительные этапы проектирования и высокие капитальные затраты. Стохастический характер ветра. Отказы основных узлов оборудования. Пожары. Механические разрушения конструкции. Наличие подводных кабелей при морском базировании ВЭУ	Модели турбин и их производитель. Гарантии производителей. База метеоданных по ветру. Обеспечение надежности функционирования. Оптимизация восстановительных мероприятий. Руководства по эксплуатации
Солнечная энергетика	Отказы элементов (короткое замыкание). Погодные риски (облачность и аварии). Кражи и вандализм	Гарантии на оборудование (25 лет). Унификация и взаимозаменяемость компонентов. Техобслуживание
Малые ГЭС	Затопление. Сезонные изменения водотока. Длительные простои из-за нехватки запчастей и удаленной диспетчеризации	Учет опыта эксплуатации с минимизацией рисков и затрат на техобслуживание и ремонты
Энергия биомассы	Гарантии поставок и стоимость топлива. Экологические вопросы, связанные с доставкой и хранением топлива	Долгосрочные контракты на поставку топлива. Контроль за выбросами

Таблица 2. Оценка числа смертельных случаев, вызванных различными источниками энергии, в расчете на 1 ГВт мощности

Table 2. Estimation of the number of deaths caused by various energy sources per 1 GW

Вид топлива или энергии	Число жертв на 1 ГВт мощности		Суммарное
	профессиональных	населения	
Энергия ветра	20–30	2–40	22–70
Солнечная (фотоэлектрическая)	16–21	1–40	17–61
Гидроэлектрическая	2–4	1–2	3–6
Метанол, биопродукты	110	0	110
Атомная	0,2–1,3	0,04–0,24	0,24–1,54
Уголь	2–10	3–150	5–160
Нефть	0,2–2	1,4–140	1,6–142
Природный газ	0,1–0,4	0	0,1–0,4

Необходимо создание количественных методик для оценки рисков и управления ими, а также моделей ценообразования для природоохранных рисков.

### Методика оценки риска с использованием диаграмм «причина–последствие»

Диаграммы «причина–последствие» (ДПП) представляют собой объединенные деревья событий и деревья отказов. Последствия – экономические потери.

Методика оценки риска ВИЭ предполагает несколько стадий:

Стадия 1: предварительный анализ опасностей (ПАО). Необходимо выявить подсистемы, которые могут вызвать опасные состояния ВИЭ. Предварительный анализ опасностей – это процедура с включением в рассмотрение последовательности событий, превращающих опасность в происшествие, а также корректирующих мероприятий для устранения последствий происшествия.

В целом ПАО представляет собой первую попытку выявить оборудование системы генерации ВИЭ (в принятом варианте компоновки) и отдельные события, которые могут привести к возникновению опасностей. Детальный анализ возможных событий обычно проводится с помощью метода дерева отказов [3] после того, как система полностью определена.

Стадия 2: выявление последовательности опасных ситуаций, построение дерева событий и деревьев отказов. Стадия 2 анализа обычно начинается после того, как выбрано оборудование и определена конфигурация системы. Применяют два аналитических метода, созданных на основе дерева событий (ДС) и дерева отказов (ДО). Логика, используемая при построении ДС [2], часто называется индуктивной логикой; в то же время логика, используемая при анализе с помощью ДО, является дедуктивной.

Стадия 3: анализ последствий. На конечной стадии изучения риска производят: определение вероятностей событий, подсчет ущерба для каждого варианта развития аварии; прослеживают распространение, например, фронта пожара; дают оценку воздействию на окружающую среду и повреждению оборудования; определяют общую оценку риска.

Составление ДПП начинают с выбора критического события. Критические события выбирают таким образом, чтобы они служили удобными отправными точками для анализа, причем

большинство аварийных ситуаций развивается за критическим событием в виде цепи отдельных событий. Процедура построения ДПП состоит из выбора первого инициирующего события, за которым следуют другие события, определенные на данном этапе работы.

При анализе «причин–последствий» предлагается использовать комбинированные методы дерева отказов (выявить причины, оценить их вероятность) и дерева событий (определить экономические потери).

Типичными критическими событиями, ведущими к аварийным ситуациям, могут быть возмущения основных параметров технологического процесса или, например, пожар в мотогондоле ВЭУ – событие, которое приводит в действие систему обеспечения безопасности (рис. 1).

«Выявление последствий», служащее частью анализа «причин–последствий», начинается с выбора первичного события с последующим рассмотрением всей цепи вызываемых в ВЭУ событий. На различных ступенях цепи могут разветвляться и развиваться по двум направлениям в зависимости от различных условий. Например, распространение пожара в мотогондоле ВЭУ может привести к двум цепям событий: постепенному уничтожению всей ВЭУ или к срабатыванию пожарной сигнализации с вызовом пожарной команды и локализации пожара.

Обзор и сравнение различных методов оценки риска показал, что анализ видов отказов и их последствий с помощью ДО является методом достаточно разработанным и обеспеченным программными продуктами [4]. Сказанное относится также к анализу с помощью дерева событий, хотя основные приемы для выполнения анализа этого типа не установлены достаточно строго.

Цель данной работы – развитие методики для количественной оценки риска пожара на примере автономной ВЭУ NordWind (Германия) (рис. 2).

В ветроэнергетических установках NordWind [5] реализована система гидравлического преобразования вращающей энергии лопастей во вращающую энергию ротора с поддержива-

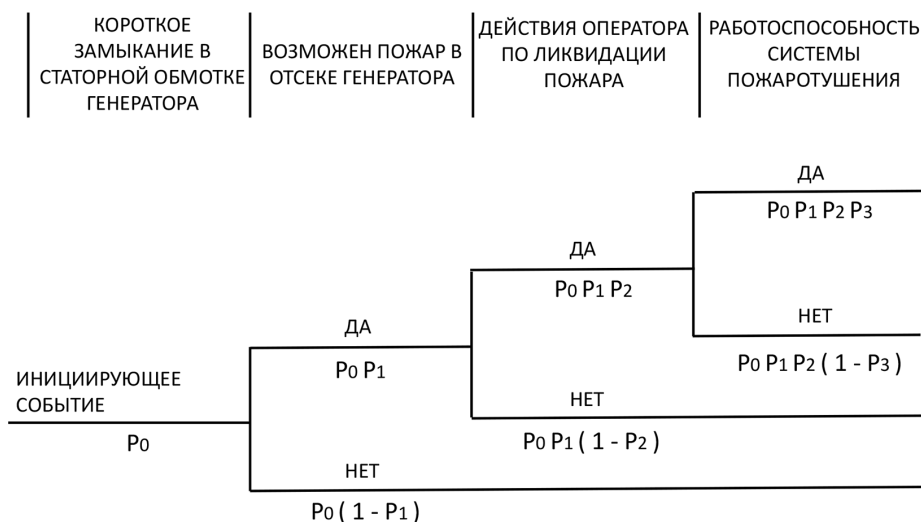


Рис. 1. Дерево событий при пожаре на ВЭУ

Fig. 1. Event tree during a wind power installation fire

емым постоянным числом оборотов. Ротор ВЭУ сначала превращает кинетическую энергию воздушной массы, движимой ветром, в механическую энергию. Энергия подводится непосредственно к гидронасосу и превращается им в гидравлическую энергию потока. После передачи жидкостной энергии следует ее обратное превращение с помощью гидравлического двигателя в механическую энергию привода, которая превращается электрогенератором в электрическую энергию.

Для оптимальной адаптации аэродинамических характеристик ротора к тем или иным условиям эксплуатации, особенно к конкретной скорости ветра в данный момент, ВЭУ работает с изменяемым числом оборотов. При этом, вследствие отсутствия геометрического замыкания при передаче усилия между ротором и генератором, сохраняется постоянное число оборотов генератора, требуемое для сохранения напряжения при подаче его в сеть, и абсолютно не зависит от числа оборотов ротора ветроколеса. Поэтому генератор можно непосредственно соединять с сетью или с автономными потребителями. Применение синхронного генератора позволило увеличить производительность ВЭУ за счет более высокого КПД синхронных машин.

Помимо перечисленных особенностей ВЭУ NordWind обладают возможностью производства тепловой энергии совместно с электрической энергией. Тепловая энергия является побочным продуктом, возникающим при производстве электроэнергии в основном за счет тепловых потерь в гидравлическом преобразователе.

Блок управления и электротехническое оборудование размещены в мотогондоле и башне и защищены от воздействия окружающей среды. Отсюда производится автоматическое управ-

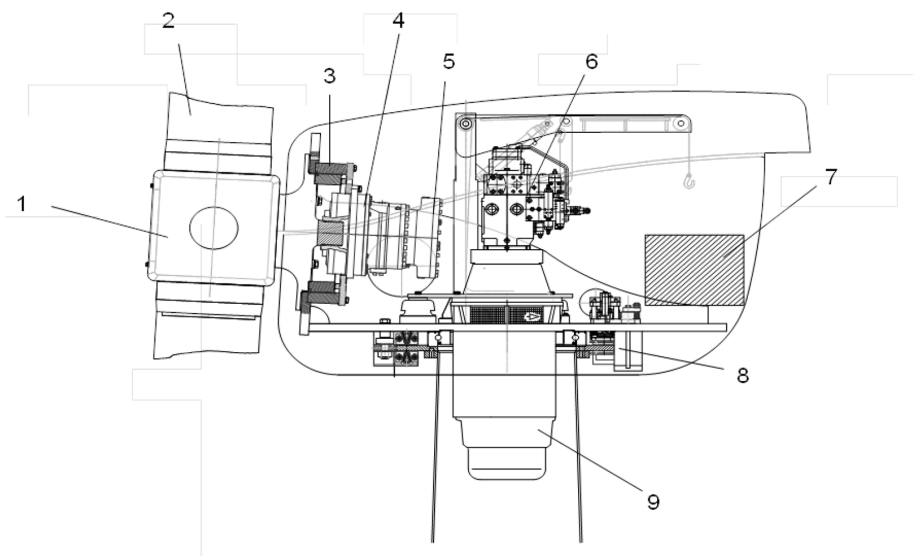


Рис. 2. Компоновка ветроэнергетической установки NordWind (вид мотогондолы сбоку): 1 – ступица; 2 – лопасть ротора; 3 – подшипник ротора; 4 – насос; 5 – аварийный тормоз; 6 – гидравлический двигатель; 7 – блок управления; 8 – тормоз по азимуту; 9 – генератор

Fig. 2. The layout of the NordWind wind power installation (side view of the engine nacelle): 1 – nave; 2 – rotor blade; 3 – rotor bearing; 4 – pump; 5 – emergency brake; 6 – hydraulic motor; 7 – control unit; 8 – brake in azimuth; 9 – generator

Таблица 3. Технические характеристики ВЭУ NordWind

Table 3. Technical characteristics of wind power installation NordWind

Тип ВЭУ	NW 24-120 HY-D	NW 28-150 HY-D
Номинальная скорость ветра, м/с	10,6	10,2
Номинальная электрическая мощность, кВт	120	150
Номинальная тепловая мощность, кВт	21,9	26,7
Высота башни, м	35	42
Диаметр ротора, м	24,1	28,1
Рабочее напряжение, кВ	0,4	0,4
Частота напряжения, Гц	50	50
Себестоимость производимой энергии, €/кВт·ч	0,10	0,08
Цена установки, тыс. евро	39,0	45,6

ление эксплуатации установки, а также контролируются различные функции безопасности. Дистанционное обслуживание и контроль ВЭУ возложены на операторов одного или нескольких пунктов управления.

Технические характеристики ветрогенераторов NordWind мощностью 120 и 150 кВт приведены в табл. 3 [5].

В этом примере при оценке риска инициирующим событием является короткое замыкание (КЗ) в генераторе, приводящее к пожару, вероятность которого определяет анализ ДО, при этом различные последствия (экономические потери) зависят от действий оператора и работоспособности противопожарных устройств.

Рассмотрим диаграмму «причина–последствие», представленную на рис. 3. Значения показателей надежности для событий отказов элементов и систем ВЭУ приведены в табл. 4.

Значение вероятности инициирующего события «КЗ в генераторе, приводящее к пожару», численно равно коэффициенту простоя для системы, выделенной пунктиром в правом нижнем блоке на рис. 3. Коэффициент простоя генератора определяют по характеристикам минимальных сечений отказов (МСО) [3]. Исходными данными для расчета надежности являются интенсивность отказов  $\lambda_j$  и интенсивность восстановления  $\mu_j$  элементов ВЭУ, а также вся совокупность МСО.

Коэффициент простоя для  $j$ -го элемента.

$$q_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} \left[ 1 - e^{-(\lambda_j + \mu_j)t} \right].$$

Тогда для вычисления вероятности существования  $i$ -го МСО запишем выражение

$$q_i^* = \prod_{j=1}^n q_j.$$

На основе вышеприведенных формул можно определить коэффициент простоя или вероятность появления инициирующего события:

$$q_c \approx \sum_{i=1}^{N_c} q_i^*.$$



В результате проведенного расчета конечному событию «КЗ в генераторе, приводящее к пожару» соответствует вероятность  $P_0 = 4,0 \cdot 10^{-3}$ .

Вероятность того, что короткое замыкание вызовет пожар, равна  $P_1 = 2,0 \cdot 10^{-2}$ , а того, что оператор не справится с пожаром, –  $P_2 = 1,0 \cdot 10^{-1}$  [2].

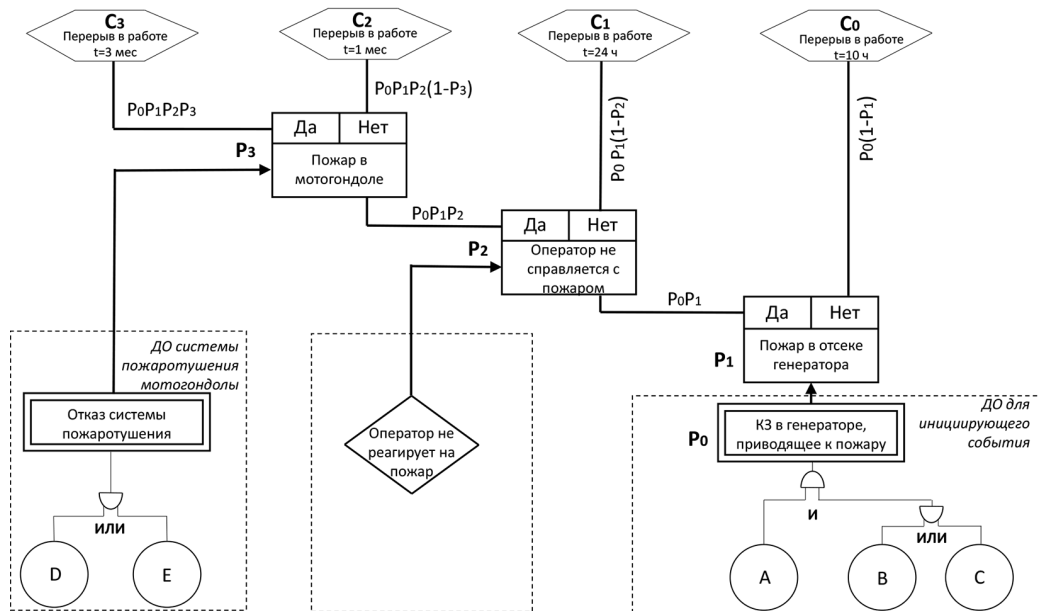


Рис. 3. Диаграмма «причина–последствие» для ВЭУ: А – повреждение изоляции генератора с КЗ; В – отказ релейной защиты в отключении КЗ; С – отказ в срабатывании генераторного выключателя; D – отсутствие сигнала управления системой пожаротушения; E – отказ системы пожаротушения

Fig. 3. The diagram cause – consequence for wind power installation: A – generator insulation damage with short circuit; B – failure of relay protection in short circuit disconnection; C – failure to operate the generator circuit breaker; D – no fire extinguishing system control signal; E – fire extinguishing system failure

Таблица 4. Показатели надежности элементов и систем ВЭУ

Table 4. Reliability indicators of elements and systems of wind power installations

Событие	Обозначение	Интенсивность отказов $\lambda_j$ , 1/год	Время восстановления (период испытания) $\tau$ , год	Вероятность события отказа, $q_j$
Повреждение изоляции генератора с КЗ	A	0,5	$32 \cdot 10^{-4}$	–
Отказ релейной защиты в отключении КЗ	B	–	–	$0,2 \cdot 10^{-2}$
Отказ в срабатывании генераторного выключателя	C	–	–	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Отказ аппаратуры противопожарной сигнализации	D	$9 \cdot 10^{-2}$	0,25	–
Отказ системы пожаротушения	E	$9 \cdot 10^{-2}$	0,5	–

Аналогичные расчеты выполнены и для ДО системы пожаротушения, выделенной пунктиром в левом нижнем блоке на рис. 3. Вероятность события «Отказ системы пожаротушения» равна  $P_3 = 4,8 \cdot 10^{-2}$ .

Значения вероятностей событий, рассмотренных в ДПП на рис. 3, приведены в табл. 5.

Таблица 5. Значения вероятностей событий

Table 5. The probabilities of the events

Обозначение вероятности события	Численное значение параметра
$P_0$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
$P_1$	$2,0 \cdot 10^{-2}$
$P_2$	$1,0 \cdot 10^{-1}$
$P_3$	$4,8 \cdot 10^{-2}$

Определим вероятности событий перерывов в работе ВЭУ с различными продолжительностями и экономическими потерями.

Событие  $C_0$ :  $P[C_0] = P_0(1 - P_1) = 3,92 \cdot 10^{-3}$ .

Событие  $C_1$ :  $P[C_1] = P_0P_1(1 - P_2) = 7,90 \cdot 10^{-5}$ .

Событие  $C_2$ :  $P[C_2] = P_0P_1P_2(1 - P_3) = 7,62 \cdot 10^{-7}$ .

Событие  $C_3$ :  $P[C_3] = P_0P_1P_2P_3 = 3,84 \cdot 10^{-7}$ .

Последствиями пожара являются экономические потери, обозначенные  $K_0, K_1, K_2, K_3$  для всех событий  $C_0 - C_3$ . Они составят 1 000 €, если будет повреждено оборудование при КЗ без пожара (с вероятностью  $P_0(1 - P_1)$ ), и до 30 000 €, если полностью сгорит мотогондоло и лопасти ВЭУ (вероятность равна  $P_0P_1P_2P_3$ ). Последствия при замене поврежденных деталей и узлов  $K_i$  в денежном эквиваленте определены на основе экспертных оценок.

В работе применяется упрощенный метод вычислений ущерба от недоотпуска энергии ВЭУ. Тариф за 1 кВт·ч выработанной ВЭУ электрической или тепловой энергии составит  $c = 0,20$  €/кВт·ч. Тогда ущерб от простоя в течение 1 ч при электрической мощности ВЭУ  $P_{ВЭУ} = 150$  кВт и тепловой –  $Q_{ВЭУ} = 26,7$  кВт в равен  $U = (150 + 26,7) \cdot 0,20 \cdot 1 = 35,34$  €.

Оценка риска эксплуатации ВЭУ за три месяца года определена по выражению

$$R = \sum_{i=0}^3 [K_i + c \cdot t_i \cdot (P_{ВЭУ} + Q_{ВЭУ})] \cdot P(C_i), \quad i = (0, 1, 2, 3),$$

где  $t_i$  – длительность перерывов в работе ВЭУ, ч.

Результаты расчетов отражены в табл. 6.

Риски экономических потерь в результате пожара на ВЭУ определяются величинами вероятностей отказов элементов и подсистем ВЭУ. Величина экономических потерь зависит также от длительности периода простоя ВЭУ.

Таблица 6. Вычисление риска аварийных событий

Table 6. Calculation of the risk of emergency events

Событие	Перерыв в работе $t_i$ , ч	$K + U$ , €	Вероятность события перерыва в работе ВЭУ $P(C_i)$ , о. е.	Риск $R$ , €
$C_0$	10	1 353,4	$3,92 \cdot 10^{-3}$	5,303
$C_1$	24	10 848	$7,90 \cdot 10^{-5}$	0,869
$C_2$	720	45 445	$7,62 \cdot 10^{-6}$	0,346
$C_3$	2 160	106 334	$3,84 \cdot 10^{-7}$	0,041
Величина риска за 3 месяца				6,559

### Заключение

Предложена методика для количественной оценки риска в случае пожара на автономной ветроэнергетической установке с применением диаграммы «причина–последствия», являющейся комбинацией методов дерева событий и дерева отказов. Показано применение методики для оценки риска экономических последствий пожара на ВЭУ типа NordWind 28-150 HY-D.

### Список литературы / References

- [1] Лесных В.В. Анализ риска и механизмов возмещения ущерба от аварий на объектах энергетики. Новосибирск: Наука, 1999. 251 с. [Lesnykh V. V. *Analysis of risk and mechanisms for compensation for damage from accidents at energy facilities*. Novosibirsk, Science, 1999. 251 p. (in Russian)]
- [2] Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с. [Henley E.J., Kumamoto H. *Reliability of technical systems and risk assessment*. M., Mechanical Engineering, 1984. 528 p. (in Russian)]
- [3] Гук Ю.Б., Синенко М.М., Тремясов В.А. Расчет надежности схем электроснабжения. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 208 с. [Guk Yu.B., Sinenko M.M., Tremyasov V.A. *Calculation of the reliability of power supply schemes*. L., Energoatomizdat, Leningrad. Department, 1990. 208 p. (in Russian)]
- [4] Tremyasov V.A., Krivenko T.V. Reliability Evaluation Method of the Wind-Diesel Installation with Application of Dynamic Fault Tree. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, 10(3), 414–425.
- [5] Бобров А.В., Тремясов В.А. Ветродизельные комплексы в децентрализованном электроснабжении. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 216 с. [Bobrov A.V., Tremyasov V.A. *Wind-diesel complexes in decentralized power supply*. Krasnoyarsk, Sib. Feder. Univ., 2012. 216 p. (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0260

УДК 621.1.016.4.(075.8)

## Thermal Efficiency of a Solar Air-Heating Collector with a Metal Chip Absorber

**Mirsoli O. Uzbekov and Azamat G. Tukhtasinov\***

*Ferghana Polytechnic Institute  
Ferghan, Republic of Uzbekistan*

Received 12.03.2020, received in revised form 21.04.2020, accepted 21.05.2020

**Abstract.** It is known that one of the main issues of heat transfer in complex designs of solar air-heating collectors is the problem of determining the coefficient of convective heat transfer in some parts of absorbers. The article studies the processes of heat transfer occurring in a solar air-heating collector with an absorber, which is a system of metal flow chips and a V-shaped surface. A description of the design of a solar air-heating collector with a metal chip absorber is given. The absorber allows us to increase the contact surface between the coolant and the absorber. The experimental procedure and the results are presented. The experiments have shown that within the range of 850 – 950 W / m<sup>2</sup> of direct incident solar radiation density, the average heating of coolant is 17.5 °C; within the range of 650 – 750 W / m<sup>2</sup>, it is 14.1 °C; within the range of 450 – 550 W / m<sup>2</sup>, it measures 10.1 °C. The maximum coolant heating is 27 °C which is equal to the output collector temperature 60 °C. The average heating of the coolant is 14 °C, which corresponds to the average output temperature of 45 °C. According to the data obtained in the experiment, empirical formulas are concluded. They are presented in the form of the dependence  $Nu = f(Re)$ , it is aimed at determining the heat transfer coefficient of flow metal chips and V-shaped absorbers of a solar air-heating collector. The dependence of the absorbers heat transfer from metal flow chips and the V-shaped surface of the solar air-heating collector on the Re numbers within the range of 103÷104 is shown. A formula is derived that allows us to compare the effectiveness of absorbers of various types with a flat absorber of a solar air-heating collector.

**Keywords:** renewable energy sources, solar energy, solar air-heating collectors, absorber, efficiency, heat transfer, thermal efficiency.

Citation: Uzbekov M.O., Tukhtasinov A.G. Thermal efficiency of a solar air-heating collector with a metal chip absorber, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 712-720. DOI: 10.17516/1999-494X-0260

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: education.fer@mail.ru; a.tukhtasinov@ferpi.uz

## Тепловая эффективность солнечного воздухонагревательного коллектора с металлическим стружечным абсорбером

М.О. Узбекиов, А.Г. Тухтасинов

Ферганский политехнический институт  
Республика Узбекистан, Фергана

*Аннотация.* Известно, что одним из основных вопросов теплообмена в сложных конструкциях солнечного воздухонагревательного коллектора считается проблема определения коэффициента конвективного теплообмена на отдельных участках абсорбера. В статье исследованы процессы теплообмена, протекающие в солнечном воздухонагревательном коллекторе с абсорбером, представляющем собой систему металлических сливных стружек и V-образную поверхность. Приводится описание конструкции солнечного воздухонагревательного коллектора с металлическим стружечным абсорбером, позволяющей увеличить контактную поверхность между теплоносителем и абсорбером, методика и результаты эксперимента. Эксперименты показали, что в диапазоне плотности прямой падающей радиации солнечного излучения 850–950 Вт/м<sup>2</sup> средний нагрев теплоносителя составляет 17,5 °С, в диапазоне 650–750 Вт/м<sup>2</sup> – 14,1 °С, в диапазоне 450–550 Вт/м<sup>2</sup> – 10,1 °С. Максимальный нагрев теплоносителя 27 °С, равный выходной температуре с коллектора 60 °С, средний нагрев теплоносителя 14 °С, что соответствует выходной средней температуре 45 °С. На основании полученных данных в экспериментальных исследованиях получены эмпирические формулы в виде зависимости  $Nu = f(Re)$  для определения величины коэффициента теплоотдачи сливных металлических стружек и V-образных абсорберов солнечного воздухонагревательного коллектора. Показаны зависимости теплоотдачи абсорберов из металлической сливной стружки и V-образной поверхности солнечного воздухонагревательного коллектора от чисел  $Re$  в диапазоне  $10^3 \div 10^4$ . Выведена формула, позволяющая сравнить эффективность абсорберов различного типа с плоским абсорбером солнечного воздухонагревательного коллектора.

*Ключевые слова:* возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, солнечные воздухонагревательные коллекторы, абсорбер, эффективность, теплоотдача, тепловая эффективность.

Цитирование: Узбекиов, М.О. Тепловая эффективность солнечного воздухонагревательного коллектора с металлическим стружечным абсорбером / М.О. Узбекиов, А.Г. Тухтасинов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 712-720. DOI: 10.17516/1999-494X-0260

**Введение.** Солнечная энергия является свободно доступным, бесконечным, экологически чистым энергоресурсом. [1]. Одно из перспективных направлений возобновляемой энергетики – прямое получение экологически чистого тепла для системы кондиционирования, сушки сельскохозяйственной продукции с преобразованием солнечной радиации [2, 3]. Среди различных типов солнечных тепловых установок солнечные воздухонагревательные коллекторы (СВК) широко используют из-за более низкой стоимости и простоты конструкции [4, 5]. Существует много вариантов СВК для нагрева воздуха, преимущество имеют СВК с плоским гладким абсорбером благодаря простоте конструкции, простоте в эксплуатации, низкому техническому обслуживанию. Основные типы СВК с плоским абсорбером [6, 7] обладают низкими тепловыми характеристиками из-за меньшего теплоусвоения путем прохождения воздуха через канал в виде конвективного теплообмена. Полезное тепло из СВК может быть извлечено

естественным или принудительным способом. Обычный СВК состоит из остекления, поглотителя, нижней плиты и изоляционных материалов [8, 9]. Поток воздуха проходит над или под пластиной поглотителя для сбора тепла, иногда с обеих сторон. Основная задача при использовании воздуха в качестве теплоносителя – повышение коэффициента теплоотдачи. Поэтому необходимо улучшить тепловой КПД солнечного воздухонагревателя, применяя подходящий способ повышения теплопередачи. Пути повышения теплопередачи солнечных воздухонагревателей, рассмотренных авторами в [10], требуют значительного капиталовложения для создания эффективных абсорберов [11]. Из-за этого также остается актуальным вопрос снижения экономических затрат на изготовление эффективных абсорберов и солнечных воздухонагревателей.

**Методы и материалы.** На рис. 1 представлена конструкция солнечного воздухонагревательного коллектора (СВК) с металлическим стружечным абсорбером. СВК содержит легкий теплоизолированный корпус из трехстенной двухкамерной пластмассы 1, на которой установлен каркас 2 для уплотнения крышки 8 и корпуса 1, три перегородки установлены 3 поперек относительно потока воздуха на дне корпуса, абсорбер из V-образного волнистого металлического листа, состоящий из ряда V-образных форм 4, установлен поперек каналов относительно движения воздуха, укрепленный на перегородке каркас 5 из алюминиевого профиля, каркас металлической сетки установлен на металлическом листе V-образной формы, металлическая сетка 6, натянутая в каркасе, абсорбер из нержавеющей стальных сливных стружек 7, сливные стружки установлены поперек относительного движения воздуха, они равномерно распределены на металлической сетке, крышка 8 солнечного воздухонагревателя оснащена прозрачным покрытием 9, выполнена из стекла, подводящий 10 и отводящий 11 воздух патрубки, вентилятор 12 для нагнетания воздуха через подводящий патрубок.

Геометрические размеры разработанной конструкции: длина коллектора 1,5 м, высота коллектора 0,072 м, ширина коллектора 0,5 м. Площадь абсорбера V-образной формы 0,7 м<sup>2</sup>, площадь абсорбера из металлической стружки 0,725 м<sup>2</sup>.

СВК работает следующим образом: воздух, нагнетаемый вентилятором 12, поступает в пространство через подводящий патрубок 10 в нижнюю часть абсорбера в канал, состоящий из V-образного волнистого металлического листа 4 и дна коллектора 1. Воздушный поток, омывая тыльную сторону абсорбера из V-образного волнистого металлического листа 4, обтекает перегородки 3. Далее воздух поступает через воздушный канал в пространство между верхней частью абсорбера из V-образного волнистого металлического листа и прозрачным покрытием 9, воздух омывает абсорбер из нержавеющей стальных сливных стружек 7 и верхнюю часть абсорбера из V-образного волнистого металлического листа. Далее воздух через отводящие патрубки 11 выходит из коллектора.

Воздух, обтекая перегородки 3, установленные в дне корпуса 1, многократно меняет свое направление, искусственно увеличивая свой путь прохождения через СВК.

Экспериментальные исследования СВК проводили в следующем порядке: при фиксированном значении угла наклона СВК 45°, при фиксированном расходе воздуха, расход воздуха варьировался за счет изменения напряжения вентилятора, при различных режимах массового расхода воздуха и солнечной радиации, с предварительным включением регистрирующих приборов.

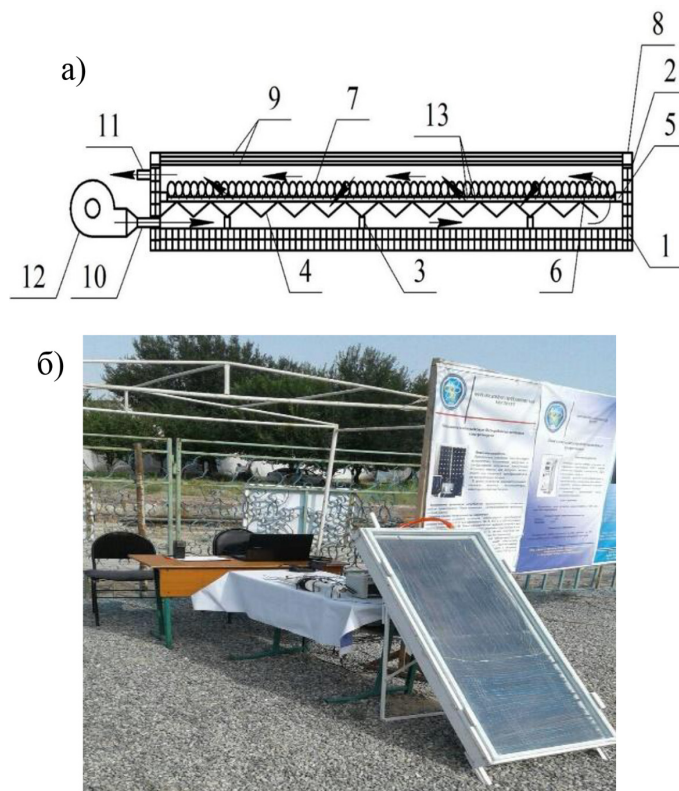


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) экспериментального СВК

Fig. 1. Schematic diagram (a) and general view (b) of the experimental ICS

В табл. 1 приводится пример протокола испытания, разработанного СВК.

На основании полученных в опытах результатов рассчитана теплообменная эффективность теплопередачи СВК. Формулы теплообмена на отдельных абсорберах представляются в виде

$$Nu = A(Re)^n. \quad (1)$$

Представление формул теплообмена в таком виде соответствует положениям теории подобию, которая для жидкостей и газов записывается в общем виде:

$$Nu = A(Re Pr)^n. \quad (2)$$

Если считать, что для газов (воздуха)  $Pr \approx 1$ , формула (2) преобразуется в формулу (1). Обработка полученных экспериментальных данных позволила получить для V-образного абсорбера формулу теплообмена:

$$Nu_V = 0,014 Re^{0,83}, \quad (3)$$

для стружечного абсорбера

$$Nu_{cm} = 0,02 Re^{0,82}. \quad (4)$$



Таблица 1. Протокол испытания солнечного воздушнонагревательного коллектора

Table 1. Solar Hot Air Collector Test Report

Протокол испытания от 15.09.2019 года								
№	G, кг/с	t <sub>вх</sub> , °C	t <sub>вых</sub> , °C	Солнечная радиация Вт/м <sup>2</sup>		t <sub>2</sub> , °C	t <sub>3</sub> , °C	t <sub>4</sub> , °C
				Прямая	Диффузная			
1	0,0025	33,8	60,8	803	100	41,9	52,5	53,2
2	0,0033	33,8	60,3	805	100	41,75	51,5	52,8
3	0,0061	32,8	57,8	804	95	40,3	49,6	50,8
4	0,009	33,1	57,1	806	95	40,3	48,4	50,4
5	0,015	32,8	54,3	796	100	39,3	46,1	48,3
6	0,0233	33,1	53,1	796	103	39,1	44,9	47,5
7	0,0284	33,1	50,1	796	103	38,2	43,5	45,3
8	0,0323	33,2	48,2	800	100	37,7	42,1	44
9	0,0387	33,1	45,7	798	102	36,9	40,8	42,2
10	0,0438	33,4	44,6	798	102	36,8	39,9	41,5
11	0,0497	33,3	43,4	800	102	36,3	39,2	40,6

При расчетах теплообмена за определяющий размер для V-образного абсорбера эквивалентный диаметр канала воздушнонагревателя принят равным 0,026 м.

$$\alpha = \frac{Gc_p(t''-t')}{F\Delta t} = \frac{0,0493 \cdot 2,4 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 5} = 26,3,$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = \frac{26,3 \cdot 0,026}{0,027} = 25,3.$$

В табл. 2 приведены результаты расчета теплообмена V-образного абсорбера.

$$\alpha = \frac{Gc_p(t''-t')}{F\Delta t} = \frac{0,0493 \cdot 12,4 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 9,9} = 68,5,$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = \frac{68,5 \cdot 0,015}{0,027} = 38.$$

В табл. 3 приведены результаты расчета теплообмена стружечного абсорбера.

Результаты расчета теплоотдачи по (3) и (4) V-образного и металлического стружечного абсорбера солнечного воздушнонагревательного коллектора представлены на рис. 2.

Обобщенная формула эффективности теплоотдачи абсорбера солнечного воздушнонагревательного коллектора получена путем применения метода суперпозиции. Смысл метода суперпозиции заключается в том, что каждая из поверхностей абсорбера вносит свой определенный вклад в общий процесс переноса теплоты в солнечном воздушнонагревательном коллекторе. Так как поток воздуха последовательно проходит отдельные абсорберы, то принимаем, что скорость в участках постоянна,  $w_1 = w_2 = w_3 = w_{г\lambda}$ , диаметры каналов солнечного воздушнонагревательного коллектора,  $d_1 = d_2 = d_3 = d_{г\lambda}$ , одинаковы, одинаковы и значения чисел  $Re_1 = Re_2 = Re_3 = Re_{г\lambda}$  в каналах солнечного воздушнонагревательного коллектора.

Таблица 2. Результаты расчетов теплообмена V-образного абсорбера

Table 2. Results of calculations of heat transfer of a V-shaped absorber

N	$Re_{эл}$	Теплообмен V-образного абсорбера		
		Экспериментальные данные	$Nu_V = 0,014 Re^{0,83}$	Погрешность, %
1	9269	25,3	27,46	7,8
2	8222	23,2	24,86	6,7
3	7264	20,9	22,43	6,8
4	6066	18,4	20	8
5	5373	16,5	17,46	5,5
6	4333	14,1	14,61	3,5

При расчетах теплообмена для стружечного абсорбера за определяющий размер принят диаметр стружки 0,015 м.

Таблица 3. Результаты расчета теплообмена стружечного абсорбера

Table 3. Results of calculating the heat transfer of the metalline fillings absorber

N	$Re_{эл}$	Теплообмен стружечного абсорбера		
		Экспериментальные данные	$Nu_{ст} = 0,02 Re^{0,82}$	Погрешность, %
1	9269	38	35,8	6,14
2	8222	33,7	32,46	3,8
3	7264	27,9	29,32	4,8
4	6066	23,7	25,9	8,5
5	5373	21,5	22,89	6,1
6	4333	18,1	19,19	5,7

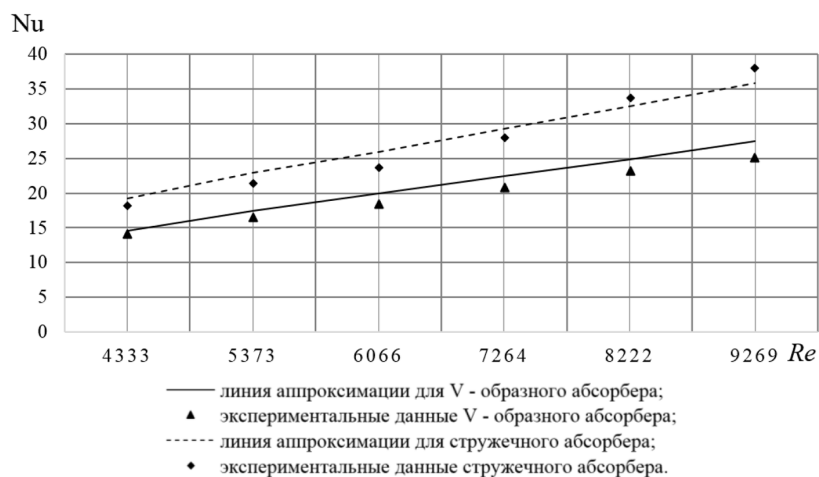


Рис. 2. Зависимость теплоотдачи абсорберов из металлической сливной стружки и V-образной поверхности солнечного воздушнонагревательного коллектора от чисел  $Re$

Fig. 2. The dependence of the heat transfer of absorbers from metal drainage chips and the V-shaped surface of the solar air heater collector on the numbers  $Re$

В общем случае формула теплообмена имеет вид (1), а для V-образного абсорбера солнечного воздушнонагревательного коллектора формула эффективности теплоотдачи имеет вид

$$\frac{Nu_V}{Nu_{\text{эл}}} = \frac{A_V Re^{n_V}}{C Re_{\text{эл}}^m} = \frac{A_V}{C} Re^{n_V-m}. \quad (5)$$

Для стружечного абсорбера солнечного воздушнонагревательного коллектора

$$\frac{Nu_{\text{см}}}{Nu_{\text{эл}}} = \frac{A_{\text{см}} Re^{n_{\text{см}}}}{C Re_{\text{эл}}^m} = \frac{A_{\text{см}}}{C} Re^{n_{\text{см}}-m}. \quad (6)$$

Общая формула эффективности теплообмена солнечного воздушнонагревательного коллектора на основании вышеуказанного имеет вид

$$\frac{Nu}{Nu_{\text{эл}}} = \frac{F_V Nu_{\text{эл}} \frac{A_V}{C} Re_{\text{эл}}^{n_V-m} + F_{\text{см}} Nu_{\text{эл}} \frac{A_{\text{см}}}{C} Re_{\text{эл}}^{n_{\text{см}}-m}}{F Nu_{\text{эл}}} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{A_V}{C} Re^{n_V-m} + \frac{A_{\text{см}}}{C} Re^{n_{\text{см}}-m} \right], \quad (7)$$

где  $n_V$ ,  $n_{\text{см}}$ ,  $m$  – tg угла наклона прямой линии, находятся из экспериментальных данных по оси абсцисс для каждого абсорбера  $\lg Re$  (для гладкого абсорбера  $m = 0,80$ , для V-образного абсорбера  $n_V = 0,83$ , для металлического стружечного абсорбера  $n_{\text{см}} = 0,82$ );  $A_V$ ,  $A_{\text{см}}$ ,  $C$  – постоянные числовые коэффициенты, находятся из экспериментальных данных (для гладкого абсорбера  $C = 0,018$ , для V-образного абсорбера  $A_V = 0,014$ , для металлического стружечного абсорбера  $A_{\text{см}} = 0,02$ );  $F_V$ ,  $F_{\text{см}}$ ,  $F$  – площади абсорберов,  $\text{м}^2$ ;  $Nu_V$ ,  $Nu_{\text{см}}$ ,  $Nu_{\text{эл}}$  – числа Нуссельта для каждого абсорбера.

В табл. 4 приведена эффективность абсорберов относительно гладкой поверхности.

**Анализ результатов.** Из данных табл. 4 следует что теплопередающая эффективность 1-го абсорбера практически не меняется, однако за счет повышения теплопередающей эффективности 2-го абсорбера при числах  $Re$  от 9269 до 4333 увеличивается эффективность СВК с металлической стружкой. Данная закономерность, полученная в результате экспериментов, объясняет тот факт, что при снижении чисел и, как следствие, скорости воздушного потока происходит повышение колебаний температуры.

Эффективность достигается за счет увеличения времени прохождения потока через 2 абсорбер, а также вследствие высокой эффективности теплообмена на поверхности металлической стружки.

Таблица 4. Эффективность абсорберов относительно плоской поверхности

Table 4. Efficiency of absorbers relatively flat surface

$Re$	9269	8222	7264	6066	5373	4333
$\frac{Nu}{Nu_{\text{эл}}}$	1,17	1,17	1,17	1,16	1,16	1,16
$\frac{Nu_1}{Nu_{\text{эл}}}$	1,02	1,02	1,01	1,0	1,0	1,0
$\frac{Nu_2}{Nu_{\text{эл}}}$	1,33	1,33	1,33	1,32	1,32	1,32

Невысокая тепловая эффективность теплопередачи первого абсорбера относительно второго объясняется тем, что первый абсорбер играет роль подогрева наружного воздуха в первой ступени. Кроме того, низкая тепловая эффективность первого абсорбера связана с недостаточным поглощением солнечной энергии профилированным листом по сравнению с высокопоглощающей эту энергию поверхностью металлической стружки.

### Вывод

Использование стружечного теплоприемника СВК повышает тепловую эффективность на 15 % относительно V-образного теплоприемника.

### Список литературы / References

- [1] Renewables 2007 Global Status Report. [www.ren21.net](http://www.ren21.net).
- [2] Попель О.С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике. Рос. хим. журнал, 2008, LII(6). [Popel O.S. Renewable energy sources: role and place in modern and promising energy. *Grew up. chem. g.* (Zh. Ros. Chem. Society named after D.I. Mendeleev), 2008, LII(6) (in Russian)]
- [3] Kuchkarov, A.A., Khaitmukhamedov, A.E., Shukurov, A.O. et al. Calculation of Thermal and Exergy Efficiency of Solar Power Units with Linear Radiation Concentrators. *Appl. Sol. Energy* 2020, 56, 42–46. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20010089>.
- [4] Виссарионов В.И., Золотов Л.А. Экологические аспекты возобновляемых источников энергии. М.: Изд-во МЭИ, 2008. 156 с. [Vissarionov V.I., Zolotov L.A. *Ecological aspects of renewable energy sources*. Moscow: MPEI Publishing House, 2008. 156 p. (in Russian)]
- [5] Avezov R.R., Avezova N.R., Matchanov N.A., Suleimanov Sh.I., Abdukadirova R.D. History and State of Solar Engineering in Uzbekistan. *Applied Solar Energy*, 2012, 48(1), 14–19.
- [6] Uzbekov M.O. Thermal balance of the solar air heater with a heat sink of metal shavings. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, 6(5), 9246-9254
- [7] Oussama Touaba, Mohamed Salah Ait Cheikh, Mohamed El-Amine Slimani et al. Experimental investigation of solar water heater equipped with a solar collector using waste oil as absorber and working fluid. *Solar Energy*, 2020, 199(15), 630-644.
- [8] Узбекиков М.О. и др. Исследование термического сопротивления солнечного воздушно-нагревателя с металлической стружкой. Энергосбережение и водоподготовка, 2019, 4, 29-33. [Uzbekov M.O. et al. Investigation of the thermal resistance of a solar air heater with metal shavings. *Energy saving and water treatment*, 2019, 4, 29-33 (in Russian)]
- [9] Avezov R.R. and Lutpullaev S.L., The State of Art, Trends and Problems for Applying the Renewable Energy Sources in Uzbekistan, “Fizika v Uzbekistane”. Materialy konf., posvyashchennoi “Godu fiziki–2005” (Proc. Conf. “Physics in Uzbekistan” Dedicated to “Solar Year–2005”), Tashkent: AN RUz, Sept. 27–28, 2005, pp. 119–123.
- [10] Uzbekov M.O. Possibilities of increasing the efficiency of the heat receiver of ics from metal shavings. *Computational nanotechnology*, 2019, 2, 138-140.
- [11] Узбекиков М.О., Тухтасинов А.Г. Измерения температуры нагрева абсорбера солнечного воздушнонагревательного коллектора. *Universum: Технические науки: электрон. на-*

учн. журн. 2020, 6(75). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/9604> [Uzbekov M.O., Tukhtasinov A.G. Measurements of the heating temperature of the absorber of the solar air heating collector. *Universum: Technical sciences: electron. scientific. zhurn.* 2020, 6 (75) (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0261

УДК 62-52:656.56

## **The Assessment of the Operational State of Traction Power Transformers by means of Decision Tables with Fuzzy Input Parameters**

**Vladimir A. Tremyasov and Vladislav G. Belov\***

*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 24.02.2020, received in revised form 29.03.2020, accepted 21.05.2020

---

*Abstract.* The paper deals with the decision tables method in order to assess the state of traction substation transformers and to make control decisions. This approach allows us to evaluate the state of a substation power transformer with the changes in diagnostic parameters that were determined by means of a fuzzy set theory.

*Keywords:* traction substation, uncertainty of diagnostic parameters, decision tables, fuzzy set theory, membership function.

---

Citation: Tremyasov V.A., Belov V.G. The assessment of the operational state of traction power transformers by means of decision tables with fuzzy input parameters, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 721-731. DOI: 10.17516/1999-494X-0261

---

## **Оценка эксплуатационного состояния тяговых силовых трансформаторов с использованием таблиц решений при нечетких входных параметрах**

**В.А. Тремясов, В.Г. Белов**

*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

---

*Аннотация.* В работе для оценки состояния трансформаторов тяговой подстанции и принятия управляющих решений предлагается метод с использованием таблиц решений. Применяя

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: belov\_v2012@mail.ru

этот подход, оценку состояния силового трансформатора подстанции можно дать с учетом изменений диагностических параметров, определенных на основе теории нечетких множеств.

**Ключевые слова:** тяговая подстанция, неопределенность диагностических параметров, таблицы решений, теория нечетких множеств, функция принадлежности.

Цитирование: Тремясов, В.А. Оценка эксплуатационного состояния тяговых силовых трансформаторов с использованием таблиц решений при нечетких входных параметрах / В.А. Тремясов, В.Г. Белов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 721-731. DOI: 10.17516/1999-494X-0261

## Введение

Согласно стратегии развития ОАО «РЖД» до 2025 г., планируется произвести строительство 60 новых и техническое перевооружение существующих 359 тяговых подстанций (ТП) [1]. В связи с этим возросли требования к системе оценки текущего состояния электрооборудования (ЭО). Очередность технического обслуживания и ремонта (ТОиР) осуществляется путем оценивания текущего состояния электрооборудования ТП [2].

Состояния каждого энергообъекта (трансформаторов, воздушных линий, контактной сети, распределительных устройств) классифицируются таким образом:  $N$  – не требуется вмешательства в эксплуатацию ЭО в предстоящий период;  $A$  – требуется вмешательство без отключения оборудования в ближайшее время;  $B$  – требуется проведение ТОиР с отключением оборудования в течение предстоящего периода;  $R$  – требуется вывод ЭО из работы для ТОиР.

Для всего парка энергообъектов составляются списки с оценками текущего состояния и разрабатывают графики ТОиР на квартал и на год.

Для принятия управляющих решений в процессе эксплуатации энергообъектов используют результаты мониторинга основных параметров ЭО, например данные хроматографического анализа трансформаторного масла.

Принимая во внимание неопределенность параметров и неполноту сведений об условиях эксплуатации конкретного ЭО, считаем обоснованным использовать таблицы решений с нечеткими входными параметрами [3–5]. Такой подход становится необходимым дополнением к таблицам решений, чтобы учесть неопределенность диагностических параметров в процессе эксплуатации энергообъектов тяговой подстанции.

## Метод оценки эксплуатационного состояния силового трансформатора

Таблицы решений (ТР) получили большое распространение в исследовании операций, системном анализе и для математического обеспечения ЭВМ как удобное средство, позволяющее четко и просто описывать сложные ситуации. Описывая как саму задачу, так и необходимый для ее решения алгоритм, ТР в наглядной форме позволяют определять, какие условия должны быть выполнены, прежде чем можно будет переходить к тому или иному эксплуатационному действию [4]. Таблицы решений – способ компактного представления модели со сложной логикой. ТР в простой форме могут демонстрировать связь между множеством независимых условий и действий.

Применяются различные формы записи ТР. Рассмотрим табл. 1.

Строка (или группа) в табл. 1 является основным импликантом для текущего состояния энергообъекта.



Таблица 1. Один из видов таблицы решений

Table 1. Main view of the solution table

Строка	Варианты условий (диагностических параметров)				Возможные действия после классификации состояния энергообъекта
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	
1	$y_{11}$	$y_{12}$	$y_{13}$	$y_{14}$	$N$
2	$y_{21}$	$y_{22}$	$y_{23}$	$y_{24}$	$A$
3	$y_{31}$	$y_{32}$	$y_{33}$	$y_{34}$	$B$
4	$y_{41}$	$y_{42}$	$y_{43}$	$y_{44}$	$R$

Теория нечетких множеств (ТНМ) представляет собой математический аппарат для работы с объектами, не имеющими жестких, однозначно задаваемых границ. Она позволяет формально описывать нестрогие, нечеткие, расплывчатые понятия и производить с ними различные операции. Применение ТНМ дает возможность формализовать процесс принятия решений в процессе эксплуатации при нечетких условиях [6–9].

Л. Заде ввел понятие *лингвистической переменной* [6], значениями которой являются слова или предложения естественного языка, которые описывают нечеткими значениями. Сегодня существуют достаточно четкие области, где классификация, а само собой и принимаемые решения, будут достаточно однозначными – область, близкая к идеальному состоянию ЭО, и область, близкая к полному износу ЭО [7]. Принимать решение сложнее всего, когда состояние ЭО находится в переходном режиме между этими двумя крайними состояниями и когда этот переход не скачкообразен, а непрерывен. Такая ситуация типична для реально действующих систем, и многие понятия естественного языка не могут быть формализованы с помощью классических математических понятий, так как граница между двумя классифицируемыми состояниями (например, «новый» – «старый») является нечеткой, размытой [7].

Нечеткое подмножество  $A$  множества  $X$  характеризуется функцией принадлежности  $m: X \rightarrow [0,1]$  ставит в соответствие каждому элементу  $x \in X$  число  $\mu_A(x)$  из интервала  $[0,1]$ , характеризующее степень принадлежности элемента  $x$  подмножеству  $A$ . Причем 0 и 1 представляют собой соответственно низшую и высшую степени принадлежности элемента к определенному подмножеству.

Таким образом, основное предположение состоит в том, что нечеткое множество, несмотря на расплывчатость его границ, может быть точно определено путем сопоставления каждому элементу  $x$  числа, лежащего между 0 и 1, которое представляет степень его принадлежности к  $A$ .

Над нечеткими множествами можно выполнять различные теоретико-множественные операции:

пересечения  $C = A \cap B$ ,  $\mu_C(x) = \mu_A(x) \& \mu_B(x)$ ;

объединения  $C = A \cup B$ ,  $\mu_C(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$ ;

дополнения  $C = \bar{A}$ ,  $\mu_C(x) = 1 - \mu_A(x)$ .

В работах [10, 11] был разработан метод так называемых треугольных нечетких чисел (ТНЧ), представляющих собой нечеткие числа с функцией принадлежности (ФП) в треугольном виде (рис. 1).

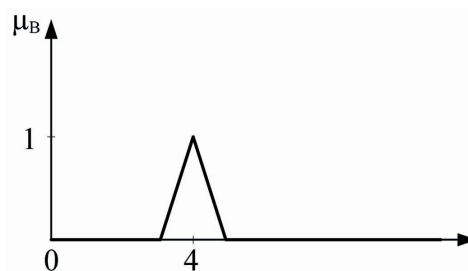


Рис. 1. Пример нечеткого множества. Пусть  $B$  – нечеткое число около 4

Fig. 1. Example of a fuzzy set. Let  $B$  be a fuzzy number about 4

Треугольное нечеткое число, которое часто обозначается  $A = (a_1, a_2, a_3)$ , определено следующей функцией принадлежности:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (x - a_1)/(a_2 - a_1) & \text{если } a_1 \leq x \leq a_2, \\ (a_3 - x)/(a_3 - a_2) & \text{если } a_2 \leq x \leq a_3, \\ 0 & \text{если } x \leq a_1 \text{ или } x \geq a_3. \end{cases} \quad (1)$$

Вычисление  $\alpha$ -сечения  $A_\alpha$  треугольного нечеткого числа выполняется по выражению

$$A_\alpha = [a_1 + \alpha(a_2 - a_1) \quad a_3 - \alpha(a_3 - a_2)]. \quad (2)$$

Каждый энергообъект получает оценки степени принадлежности к состояниям  $N$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $R$  в соответствии с данными мониторинга диагностических параметров  $\{y_{ij}\}$ . Для этого используют функции принадлежности, показанные на рис. 2. Такие функции строят для каждого диагностического параметра. Здесь:  $Z$  – нулевой уровень,  $L$  – низкий уровень,  $M$  – средний уровень,  $H$  – высокий уровень значения параметра. Если увеличение значения параметра  $y_{ij}$  свидетельствует о деградации состояния, то  $Z$  отвечает нормальному состоянию  $N$ ,  $L$  – состоянию  $A$ ,  $M$  –  $B$ ,  $H$  –  $R$ . Если уменьшение значения параметра свидетельствует о деградации, тогда  $Z$  отвечает состоянию  $R$ ,  $L$  – состоянию  $B$ ,  $M$  –  $A$ ,  $H$  –  $N$ . Значения функции принадлежности  $\mu_k(y_i)$  лежат в интервале  $[0; 1]$ . Функции имеют треугольную или линейную форму с перегибом (горизонтальный участок вне рабочего отрезка значений параметров).

Пример. Для оценки текущего состояния силового трансформатора была выбрана тяговая подстанция «Кача». В табл. 2 приведены значения диагностических параметров для тягового трансформатора ТП «Кача». Количество наблюдений равно 7 ( $j = 1, \dots, 7$ ), количество параметров – 7 ( $i = 1, \dots, 7$ ).

Критические и нормальные значения параметров взяты из справочной литературы [12] и приведены в табл. 3  $[y_i]_k$   $k = 8, 9, 10, 11$  для абсолютно уверенного диагностирования  $k$ -го состояния объекта (при этих значениях параметров функция принадлежности имеет максимум  $\mu_k(y_i) = 1$ ).

Если произведены измерения и получен ряд значений  $[y_i]_j$ ,  $j = 1, \dots, 7$  для объекта или наблюдения  $j$ , причем, возможно, некоторые измерения отсутствуют, то ряд  $[y_i]_k$  образует таблицу оценок  $[\mu_X(y_i)]_k$ , а ряд  $[y_i]_j$  – таблицу  $[\mu_X(y_i)]_j$ . Ниже приводятся две такие таблицы (табл. 4, 5) для рядов параметров и результатов наблюдений.

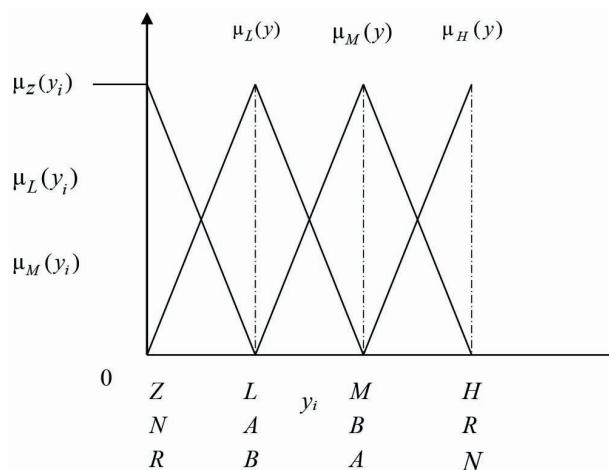


Рис. 2. Функции принадлежности диагностических параметров

Fig. 2. Functions of belonging of diagnostic parameters

Таблица 2. Результаты мониторинга параметров трансформаторного масла

Table 2. The monitoring results of parameters of transformer oil

Номер наблюдения	Дата анализа	Значения входных параметров у						
		CO <sub>2</sub> , %	CH <sub>4</sub> , %	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , %	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , %	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , %	CO, %	tgδ, %
1	28.01.19	0,098	0,0023	0,0012	0,009	0,0188	0,0137	0,15
2	25.02.19	0,107	0,0023	0,0012	0,0102	0,0194	0,0134	0,55
3	04.03.19	0,106	0,0024	0,0012	0,0102	0,0189	0,0146	1,15
4	20.05.19	0,135	0,0016	0,0011	0,0095	0,0175	0,0143	0,68
5	20.06.19	0,156	0,0013	0,0010	0,0083	0,0143	0,0193	0,88
6	19.07.19	0,150	0,0012	0,0009	0,0076	0,0125	0,0140	0,30
7	20.09.19	0,156	0,0009	0,0008	0,0069	0,0101	0,0159	0,53

Таблица 3. Ряды критических значений эксплуатационных параметров трансформаторного масла

Table 3. Series of critical values of operational parameters of transformer oil

Номер уровня	Критические и нормальные значения параметров у						
	CO <sub>2</sub> , %	CH <sub>4</sub> , %	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , %	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , %	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , %	CO, %	tgδ, %
	1	2	3	4	5	6	7
8	Критические уровни для состояния В (необходима смена масла)						
	0,07	0,003	0,003	0,001	0,0002	0,03	3,0
9	Критические уровни для состояния R (необходим ремонт)						
	0,2	0,01	0,005	0,01	0,01	0,05–0,06	5,0
10	Критические уровни для состояния А (необходимо внимание)						
	0,05–0,06	0,001	0,001	0,005	0,0001	0,015	1,0
11	Нормальные уровни параметров (состояние N)						
	0,01	0,00013	0,0001	0,0002	0,00005	0,007	0,05

Таблица 4. Результаты наблюдений параметров  $[\mu_X(y_i)]_1$ Table 4. The results of observations  $[\mu_X(y_i)]_1$ 

$i$	1	2	3	4	5	6	7
$H$	0	0,4	0	0	0	0	0,857
$M$	0	0	1	0	0	0,857	0,14
$L$	0,14	0	0	0,7	0	0,14	0
$Z$	0,857	0,57	0	0,28	1	0	0

Таблица 5. Нормальные уровни параметров  $[\mu_X(y_i)]_{11}$ Table 5. The results of observations  $[\mu_X(y_i)]_{11}$ 

$i$	1	2	3	4	5	6	7
$H$	0	0	0	0	0	0	0
$M$	0	0	0	0	0	0	0
$L$	0	0	0	0	0	0	0
$Z$	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 6. Таблица решений для состояния  $N$ Table 6. Solution table for state  $N$ 

Состояния трансформатора при уровнях параметров	Функции принадлежности параметров $\mu_X(y_i)$							Выход $\mu_X(y_i)_{\text{ср}}$
	1	2	3	4	5	6	7	
$R(Z)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$B(L)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$A(M)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$N(H)$	0	0,57	0	0	0	0	0,857	0,204

Накладывая таблицу  $[\mu_X(y_i)]_1$  на  $[\mu_X(y_i)]_{11}$ , отмечаем совпадение ненулевых элементов. Чем больше число совпадений, тем больше уверенность в том, что объект близок к состоянию 11, т.е. к  $N$ . Необходимо оценить степень уверенности. Для этого вычисляем в каждой клетке совмещенной таблицы степень принадлежности для пересечения размытых множеств  $X_j$  и  $X_k$ , которая определяется как минимум из  $\mu_X(y_i)_j$  и  $\mu_X(y_i)_k$ , и строим таблицу  $[\mu_X(y_i)]_{jk}$ :

$$\mu_X(y_i)_{jk} = \min(\mu_X(y_i)_j, \mu_X(y_i)_k). \quad (3)$$

Например, наложив приведенную выше таблицу  $[\mu_X(y_i)]_1$  на  $[\mu_X(y_i)]_{11}$ , получим таблицу решений  $[\mu_X(y_i)]_{1,11}$  следующего вида (табл. 6).

При этом наложении отмечаем две точки совпадения лингвистических оценок. Мерой совпадения в каждой точке является степень принадлежности и  $y_{ij}$  и  $y_{ik}$  в этой точке к одному

и тому же множеству (любому из множеств  $H, M, L, Z$ ). Это значит, что эта мера представляет собой меру принадлежности к объединению нечетких множеств в каждой точке. Функция принадлежности к объединению в каждой точке совпадения  $i$  определяется как

$$\mu_X(y_i) = \max_{Y,X} [\mu_X(y_i), \mu_Y(y_i)], \quad (4)$$

здесь  $Y$  и  $X$  – лингвистические переменные для точки  $i$ ;  $\mu_X(y_i)$  – мера совпадения значений параметра  $i$  (результата измерения или наблюдения) и критического значения (признака).

Для нашего примера значения  $\mu_X(y_i)$  составят: 0; 0,57; 0; 0; 0; 0; 0,857; что в среднем дает  $\mu_X(y_i)_{cp} = [0,57 + 0,857]/7 = 0,204$ . Это означает, что уверенность заключения о возможности состояния  $N$  объекта при наблюдении № 1 составляет около 20,4 % при семи критериях за выбранный период времени.

Аналогичным образом можно оценить возможности остальных состояний по всем наблюдениям. Значения функции принадлежности в соответствии с линейным характером ее изменения на отрезке между критическими значениями параметра вычисляют по следующим формулам:

$$y_i(X) \leq y_{ij} \leq y_i(Y), \text{ то } \mu_Y(y_i)_j = [y_{ij} - y_i(X)] / [y_i(Y) - y_i(X)];$$

$$\mu_X(y_i)_j = 1 - \mu_Y(y_i)_j; X(Y) \in N, A, B, R. \quad (5)$$

Когда наблюдения относятся к парку трансформаторов, то можно с помощью оценок уверенности сформировать списки и установить очередность обслуживания и ремонта. Если наблюдения относятся к различным моментам (датам) «жизни» одного трансформатора, то можно построить графики изменения уверенности в классификации состояний (рис. 3–6) и по ним прогнозировать остаточный ресурс, задав критические значения уверенности в необходимости производства ТОиР.

Таким образом, за отчетный период наблюдений для состояний  $A, B$  и  $R$  будут соответствовать следующие таблицы решений (табл. 7 – 9).

По приведенным графикам изменения уверенности состояний (рис. 3–6) можно утверждать, в какие периоды и в каком состоянии находились измеряемые параметры, превышали они допустимую норму или же нет, в какой момент состояние стабилизировалось. Например, рассматривая график уверенности состояния  $N$  (рис. 3), можно сказать, что за отчетный

Таблица 7. Таблица решений для состояния  $A$

Table 7. Solution table for state  $A$

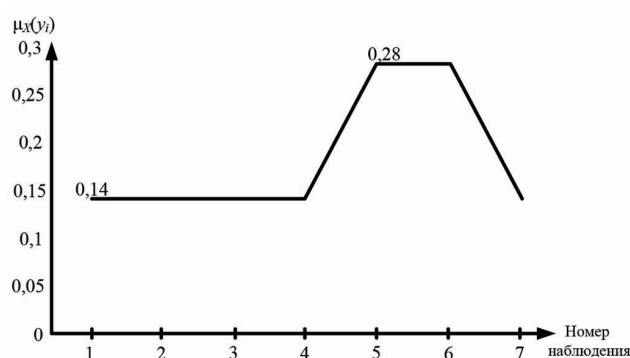
Состояния трансформатора при уровнях параметров	Функции принадлежности параметров $\mu_X(y_i)$							Выход $\mu_X(y_i)_{cp}$
	1	2	3	4	5	6	7	
$R(Z)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$B(L)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$A(M)$	0	0	1	0	0	0,857	0	0,265
$N(H)$	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 8. Таблица решений для состояния  $B$ Table 8. Solution table for state  $B$ 

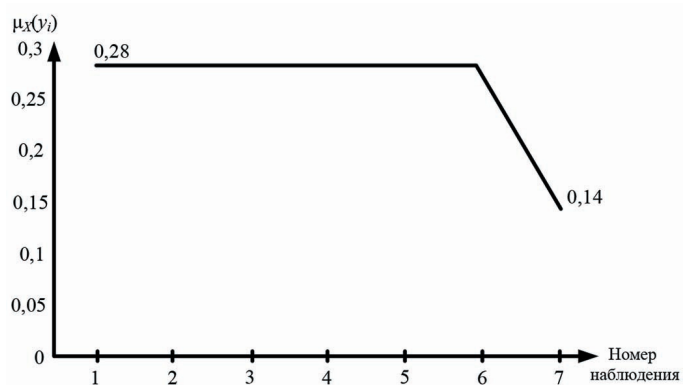
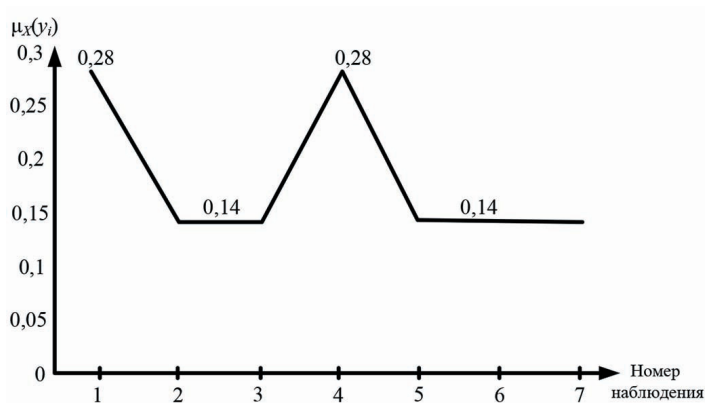
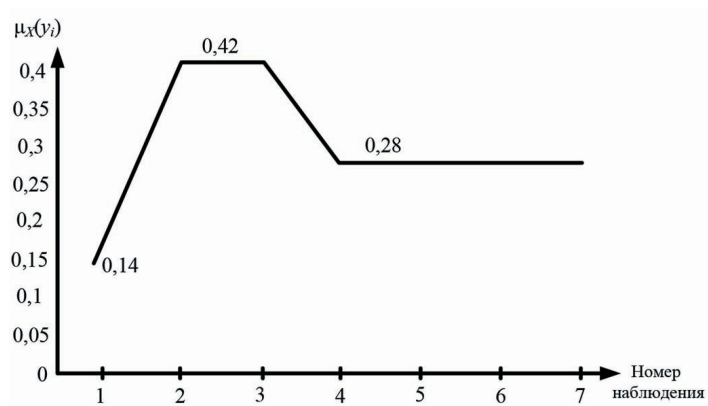
Состояния трансформатора при уровнях параметров	Функции принадлежности параметров $\mu_X(y_i)$							Выход $\mu_X(y_i)_{\text{ср}}$
	1	2	3	4	5	6	7	
$R(Z)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$B(L)$	0,14	0,56	0	0,7	0	0,14	0	0,220
$A(M)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$N(H)$	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 9. Таблица решений для состояния  $R$ Table 9. Solution table for state  $R$ 

Состояния трансформатора при уровнях параметров	Функции принадлежности параметров $\mu_X(y_i)$							Выход $\mu_X(y_i)_{\text{ср}}$
	1	2	3	4	5	6	7	
$R(Z)$	0,857	0	0	0,28	1	0	0	0,305
$B(L)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$A(M)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$N(H)$	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 3. График изменения уверенности состояния  $N$ Fig. 3. Graph of changes in the confidence state  $N$ 

период не были превышены критические значения уверенности для данного состояния оборудования [2, 12] и нет необходимости в проведении ТОиР. Если значения параметров превышают «норму», т.е. величины, которые можно ожидать за счет естественного старения, то через некоторое время (5–10 дней) повторно отбирают пробу масла и проводят анализ. В случае превышения критических значений следует ТОиР. Из полученных таблиц (табл. 6-9) для нашего примера, при наблюдении семи критериев за выбранный период времени, для каждого состояния приводится возможная уверенность его существования. Так, для состояния  $N$  она составляет около 20,4 %, для состояния  $A$  – 26,5 %, для состояния  $B$  – 22,2 %, для состояния  $R$  – 30,5 %.

Рис. 4. График изменения уверенности состояния  $A$ Fig. 4. Graph of changes in the confidence state  $A$ Рис. 5. График изменения уверенности состояния  $B$ Fig. 5. Graph of changes in the confidence state  $B$ Рис. 6. График изменения уверенности состояния  $R$ Fig. 6. Graph of changes in the confidence state  $R$



### Заключение

Рассмотренный выше метод оценивания состояния ЭО может быть положен в основу программного обеспечения экспертной системы для службы эксплуатации высоковольтного оборудования тяговых подстанций железнодорожного транспорта. Информация о результатах текущих испытаний и измерений параметров ЭО регулярно вводится и обрабатывается на компьютерах работниками службы эксплуатации. Инженеры по ЭО ТП, воздушным линиям и контактной сети получают оценки уверенности в идентификации состояния каждого поднадзорного энергообъекта по мере поступления новых сведений. На основе этих оценок составляют и корректируют план текущих и капитальных ремонтов.

Предполагается, что такая экспертная система позволит сократить трудовые и материальные затраты на ТОиР и обеспечить надежность старого оборудования.

### Список литературы / References

- [1] Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 N 877-р О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 N 877-r On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030 (in Russian)]
- [2] Васильев А.П., Гук Ю.Б., Карпов В.В. Надежность электроэнергетических установок и систем. Теория и практика. СПб.: ГУ «Ленгосэнергонадзор», 2000 [Vasiliev A.P., Guk Y.B., Karpov V.V. *Reliability of electric power installations and systems. Theory and practice*. SPb.: GU "Langselector", 2000 (in Russian)]
- [3] Pollack S.L. *Decision Tables: Theory and Practice*. New-York, Wiley-Interscience, 1971.
- [4] Хамби Э. Программирование таблиц решений, пер. с англ.; под ред. Э.З. Любимского. М.: Мир, 1976. С. 88 [Khambi E. *Programming tables of solutions*, translation from English; ed. by E.Z. Lyubimsky. M.: Mir, 1976. P. 88 (in Russian)]
- [5] Тремасов В.А. Анализ надежности электроустановок на основе таблиц решений Оптимизация режимов электропотребления промышленных предприятий и районов. Межвуз. сб. Красноярск: КрПИ, 1990, с. 43-46. [Tremasov, V.A. Analysis of reliability of electrical installation on the basis of decision tables. *Optimization of power consumption modes of industrial enterprises and districts*. Krasnoyarsk: KrPI, 1990, p. 43-46 (in Russian)]
- [6] Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis for theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1978, (1), 3-28.
- [7] Горшкова К.Л. Применение нечеткой логики и нечетких регуляторов в АСУТП. Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института, 2011, 180-184. [Gorshkova K.L. Application of fuzzy logic and fuzzy controllers in the automated control system. *Scientific notes of the Almet'yevsk state oil Institute*, 2011, 180-184 (in Russian)]
- [8] Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 208 с. [Orlovsky S.A. *Decision making problems with fuzzy initial information*. M.: Science. The main edition of the physical and mathematical literature, 1981, 208 p. (in Russian)]
- [9] Ягер Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь, 1986, 405 с. [Jager R.R. *Fuzzy sets and the theory of possibilities. Recent achievements*. Moscow: Radio and communications, 1986, 405 p. (in Russian)]

- [10] Li W., Xiong X., Zhou J., Fuzzy models of overhead power line weather-related outages. *IEEE Trans. Power Sys.* Aug. 2008, 23 (3), 1529-1531.
- [11] Li W., Xiong X., Zhou J. Incorporating fuzzy models weather-related outages in transmission system reliability assesment. *IETProceed. Generation, Transmiss. Distribut.* Jan. 2009, 3(1), 26-37.
- [12] ВСН 359-76/ММСССССР Нормы технологического проектирования тяговых сетей и подстанций для промышленного железнодорожного транспорта нормальной колеи, в том числе для Северной строительно-климатической зоны. [VSN 359-76 / MMSS of the USSR Standards of technological design of traction networks and substations for industrial railway transport of normal gauge, including for the Northern construction and climate zone (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0262

УДК 620.91:519.876.5

## **Application of GIS Technologies to Improve the Efficiency of HPP Cascades Simulation Model**

**Anna Yu. Arestova<sup>a</sup>, Sergey V. Mitrofanov<sup>a</sup>,  
Anastasiya G. Rusina<sup>a</sup> and Alexey A. Kolesnikov<sup>b\*</sup>**

*<sup>a</sup>Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies  
Novosibirsk, Russian Federation*

Received 06.06.2020, received in revised form 15.08.2020, accepted 09.09.2020

*Abstract.* The paper presents the calculation algorithm for water-energy regime of a hydroelectric power stations cascade. The block diagram of the algorithm is given for implementing the simulation model and automating the process of regime calculating. The proposed algorithm allows to evaluate the efficiency of the cascade operation, as well as to optimize the regime according to various criteria. Additionally, an option is proposed to integrate GIS monitoring data into the calculation algorithm. The sources and characteristics of Earth remote sensing data that can be used to build the model are presented.

*Keywords:* GIS technologies, earth remote sensing, simulation model, control, cascade of hydroelectric power stations.

Citation: Arestova A.Yu., Mitrofanov S.V., Rusina A.G., Kolesnikov A.A. Application of GIS technologies to improve the efficiency of HPP cascades simulation model, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 732-744. DOI: 10.17516/1999-494X-0262

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: rusina@corp.nstu.ru; alexeykw@mail.ru

## **Применение ГИС-технологий для повышения эффективности имитационного моделирования каскадов ГЭС**

**А.Ю. Арестова<sup>а</sup>, С.В. Митрофанов<sup>а</sup>,  
А.Г. Русина<sup>а</sup>, А.А. Колесников<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, Новосибирск*

*<sup>б</sup>Сибирский государственный университет  
геосистем и технологий  
Российская Федерация, Новосибирск*

*Аннотация.* В статье представлен алгоритм расчета водно-энергетического режима каскада ГЭС. Приведена блок-схема алгоритма для реализации имитационной модели и автоматизации процесса расчета режима. Предложенный алгоритм позволяет оценить эффективность работы каскада, а также провести оптимизацию режима по различным критериям. Дополнительно предложен вариант интеграции данных ГИС-мониторинга в алгоритм расчета. Приведены источники и характеристики данных дистанционного зондирования Земли, которые могут быть использованы при построении модели.

*Ключевые слова:* ГИС-технологии, дистанционное зондирование Земли, имитационное моделирование, управление, каскад ГЭС.

Цитирование: Арестова, А.Ю. Применение ГИС-технологий для повышения эффективности имитационного моделирования каскадов ГЭС / А.Ю. Арестова, С.В. Митрофанов, А.Г. Русина, А.А. Колесников // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 732-744. DOI: 10.17516/1999-494X-0262

### **Введение**

Имитационное моделирование (англ. simulation modeling) – метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему (построенная модель описывает процессы так, как они проходили бы в действительности), с которой проводят эксперименты для получения информации об этой системе.

Имитационное моделирование в настоящее время достигло широкого распространения и встречается в разнотипных исследованиях: бизнес-процессы, динамика населения, дорожное движение, железнодорожные перевозки, рынок и конкуренция, здравоохранение, машиностроение и мн. др. Если объектом управления выступает каскад ГЭС, моделирование процессов должно учитывать не только различные алгоритмы управления этим объектом, но и изменяющиеся входные параметры, диктуемые природными условиями.

В теории имитационного моделирования выделяют три основных метода: дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование и системная динамика. При сложных исследуемых системах могут использоваться многоподходные модели.

Гидроэлектростанции (ГЭС) относятся к сложным, искусственно созданным системам открытого типа со специфическими свойствами: вероятностный и неопределенный характер параметров, изменяющихся во времени, тесные взаимосвязи с социальными, экономическими, природными факторами. Сложность производственного процесса, длительность эксплуата-

ции и изменчивость влияния природных факторов в течение года делают актуальной задачу построения имитационной модели ГЭС. Имитационная модель позволяет заменить натурные эксперименты, «проиграть» и проанализировать множество состояний, скорректировать планирование режимов работы [1].

Авторами разработана имитационная модель, объединяющая гидравлический и электрический режимы электроэнергетической системы [2]. При моделировании режимов работы и состояния водохранилища ГЭС важно использовать достоверную статистическую информацию. Актуальная входная информация, а также ее краткосрочный и долгосрочный прогноз могут быть получены на основе данных системы пространственного мониторинга территории, технологий геоинформационного анализа и моделирования.

Зачастую данные наземных средств наблюдения являются высокозатратными и обеспечивают недостаточную зону покрытия (как в территориальном, так и во временном аспекте). Оптимальным решением проблемы будет использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Под данными ДЗЗ, как правило, понимают космические снимки, полученные с искусственных спутников Земли, прошедшие обработку и представляющие из себя растровое изображение поверхности Земли, а также файл с пространственными данными о снимке. Данные ДЗЗ доступны для любой территории и, соответственно, для любой существующей или проектируемой ГЭС. Дополнительным плюсом считают то, что эта информация с точностью, достаточной для проведения научных исследований, представлена в свободном доступе. Данные ДЗЗ могут быть использованы в условиях, когда невозможны наземные методы исследования, например горная местность, удаленные районы, ледниковые отложения и пр. Данные ДЗЗ применяются в качестве основы при создании баз данных для геоинформационных систем (ГИС).

### Анализ возможностей ДЗЗ

В рамках настоящего исследования необходимо оценить возможности ДЗЗ с точки зрения применимости при расчете режима каскада ГЭС. А также сузить перечень возможных исходных данных до наиболее значимых параметров для имитационной модели. Схема интеграции ГИС-технологий в имитационную модель представлена на рис. 1.

Условно данные ДЗЗ, имеющие значимость для описываемой задачи, можно разделить на две категории: географические и климатические. К первой категории относятся:

1. Геометрические параметры рельефа. Основываясь на цифровой модели рельефа, средствами геоинформационных систем можно получить ряд производных параметров, комплексно описывающих конкретное место на поверхности Земли:



Рис. 1. Интеграция ГИС-технологий в имитационную модель каскада ГЭС

Fig. 1. Integration of GIS technologies into the simulation model of a cascade of HPP

- уклон – величина, определяющая крутизну рельефа и представляющая собой максимальный коэффициент изменчивости текущей ячейки цифровой модели рельефа, относительно соседних ячеек, учитывается, например, при расчете скорости течения воды;
- экспозиция – направление по сторонам света, в котором ориентирована плоскость склона для каждой ячейки цифровой модели рельефа, наиболее часто учитывается при определении количества солнечного света, получаемого этим участком склона, либо при направлении стока;
- кривизна – величина, показывающая степень вогнутости или выпуклости поверхности, которая используется при расчете положения водосборных бассейнов;
- индекс топографической позиции (англ. TPI) – расчетная комплексная величина индекса превышения, позволяющая определять характеристики и классифицировать водоразделы, склоны и элементы рельефа.

Учитывая объект исследования, эти параметры важны при оценке:

- объема воды в речной сети,
- направления стока,
- положения площадей водосбора при выпадении осадков на конкретных территориях,
- предполагаемого объема талого снега на основе его положения относительно преобладающего направления солнечного излучения [3] (рис. 2).

2. Геометрические параметры объектов гидрографии. К ним относят площадь водной поверхности и ширину створа. Геометрические параметры объектов гидрографии подвержены

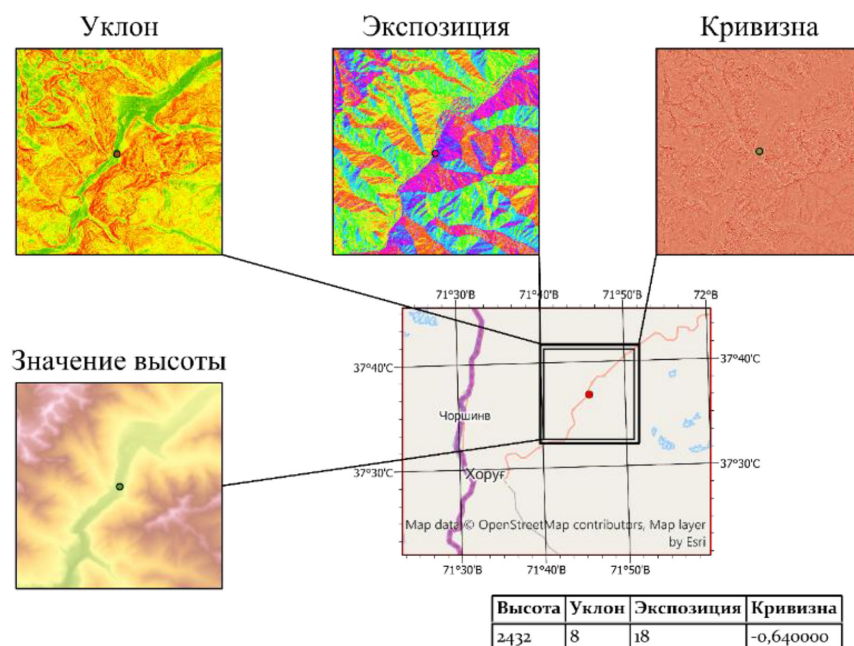


Рис. 2. Пример визуализации параметров рельефа для одного и того же участка местности и числовые значения этих же параметров для указанной точки

Fig. 2. An example of visualization of terrain parameters for the same area and numerical values of the same parameters for a specified point

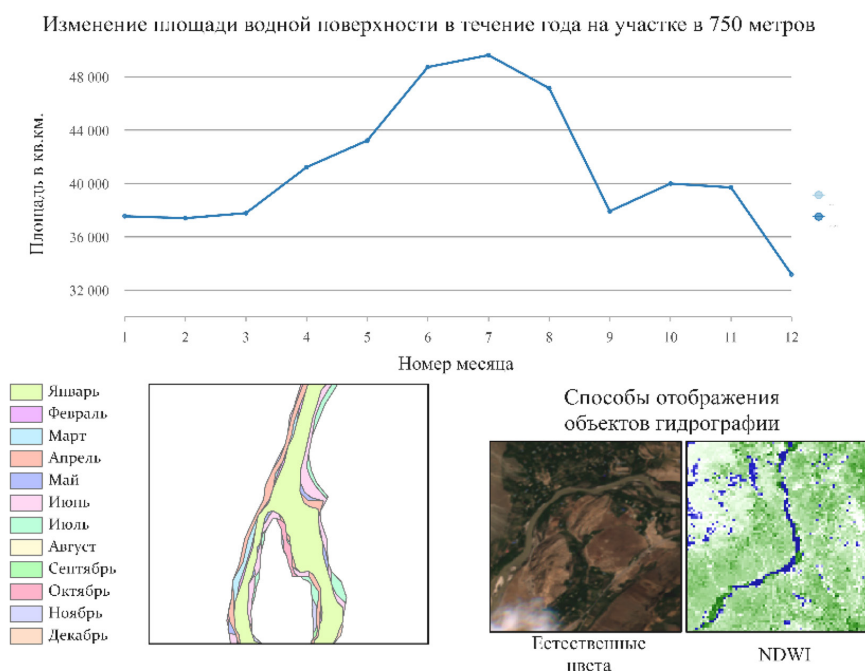


Рис. 3. Визуализация изменения площади водной поверхности, а также способы представления объектов гидрографии для ручного и автоматизированного дешифрирования контура водной поверхности

Fig. 3. Visualization of changes in the surface area of the water surface, as well as methods for representing hydrographic objects for manual and automated interpretation of the water surface contour

изменению и будут зависеть от даты исследования. Для расчета геометрических параметров необходимо на спутниковых снимках выделить границы объектов гидрографии, вручную указывая контур либо автоматически сделав выборку пикселей на основе какого-либо алгоритма автоматизированного дешифрирования (рис. 3).

Параметры географической группы являются базовыми. Объединив их, можно получить дополнительную систему гидрологических параметров (водотоки, направления стока и точки кумулятивного стока, водосборные бассейны), которые также могут быть использованы при построении имитационной модели каскада ГЭС.

Ко второй категории относятся:

1. Температура. В расчетах могут быть использованы два варианта – температура воздуха, получаемая с метеорологических постов, и температура земной поверхности, получаемая по спутниковым снимкам на основе термальных спектральных каналов [4, 5] (рис. 4).
2. Интенсивность осадков на основе микроволновой радиометрии [6-8].
3. Количественные показатели снежного покрова территорий, формирующих сток анализируемой реки: площадь снежного покрова и его толщина, основано на косвенном параметре водного эквивалента (рис. 5). Эти показатели важны для среднесрочного и долгосрочного прогнозирования [9].

Возможные исходные данные сведены в табл. 1. Также нужно отметить, что поскольку все описанные выше параметры основываются на данных растрового представления, то для базовой оценки их плановой точности указано разрешение.



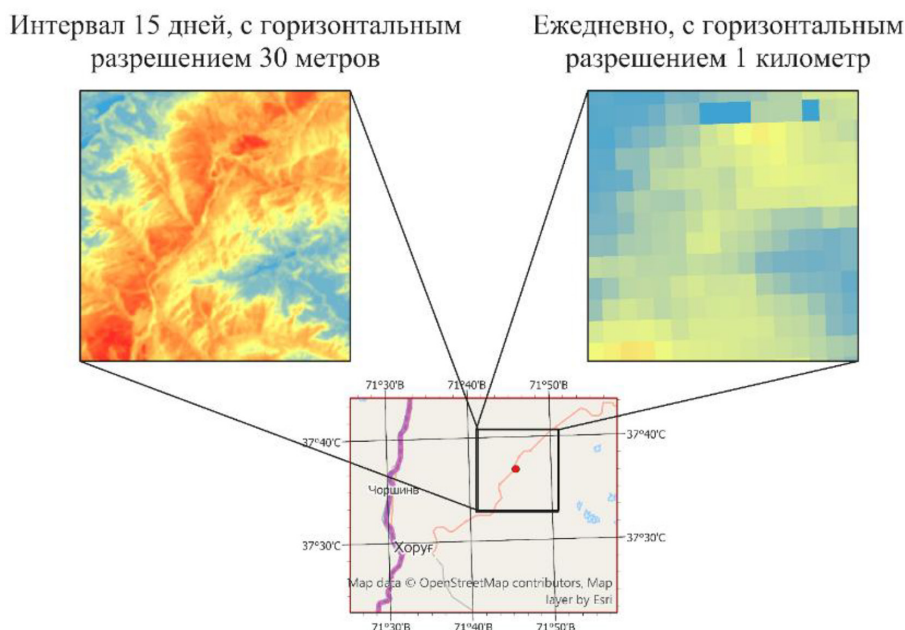


Рис. 4. Визуальное представление данных о температуре земной поверхности одного и того же участка территории для разного временного разрешения

Fig. 4. Visual presentation of data on the earth's surface temperature of the same area for different time resolutions

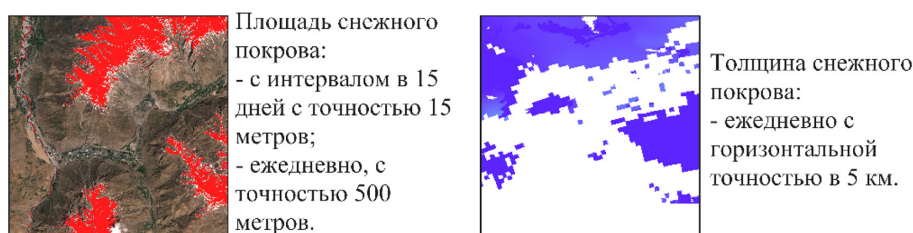


Рис. 5. Визуализация данных о состоянии снежного покрова для одной и той же территории

Fig. 5. Visualization of snow cover data for the same territory

### Интеграция ДЗЗ в задачи моделирования режимов ГЭС

Используя географические и климатические данные, нужно учитывать, что большинство из них представляют собой трехмерные матрицы, суммарно содержащие миллионы значений параметров, и применять их в исходном виде для большинства алгоритмов и математических моделей не представляется возможным. Кроме того, исходные данные и их источники выбраны таким образом, чтобы для каждого из критериев и для каждого анализируемого участка местности можно было получить ряд ретроспективных значений. Таким образом, анализируемые данные представлены в виде четырехмерных матриц. Поэтому в исследовании нужно рассмотреть и проанализировать возможные способы снижения размерности каждого из параметров и учета прошлых значений параметров (в виде самих значений, скорости изменения, разницы прогнозного и истинного значений и т.д.).

Таблица 1. Сводная таблица возможных исходных данных

Table 1. Pivot table of possible source data

Группа	Критерий	Единицы измерения	Источник	Разрешение (метры)	Интервал обновления
Географические параметры	Высота над уровнем моря	Метры	Alos Palsar Sentinel S1A	12,5 22	2007 год Ежемесячно
	Уклон	Градусы или проценты	Alos Palsar Sentinel S1A	12,5 22	2007 год Ежемесячно
	Экспозиция	Азимут в градусах	Alos Palsar Sentinel S1A	12,5 22	2007 год Ежемесячно
	Кривизна	Коэффициент кривизны в интервале значений от -4 до +4	Alos Palsar Sentinel S1A	12,5 22	2007 год Ежемесячно
	TRI	Классы типов рельефа	Alos Palsar Sentinel S1A	12,5 22	2007 год Ежемесячно
	Площадь водной поверхности	Квадратные метры	Sentinel-2 Landsat 8	10 15	Ежемесячно Ежемесячно
	Ширина створа	Метры	Sentinel-2 Landsat 8	10 15	Ежемесячно Ежемесячно
Климатические параметры	Температура поверхности Земли	Градусы Цельсия	MODIS Landsat 8	1000 30	Ежедневно Ежемесячно
	Интенсивность осадков	Мм/ч	REMSS	50	Ежедневно
	Площадь снежного покрова	Квадратные метры	MODIS Sentinel-2	500 15	Ежедневно Ежемесячно
	Глубина снежного покрова	Мм	Copernicus	5000	Ежедневно

Данные ГИС-мониторинга дают точную и актуальную информацию о гидрологических, гидрографических и климатических параметрах реки с высокой периодичностью обновления. На этапе проектирования применение ГИС-технологии позволит увеличить точность расчета конструктивных параметров ГЭС и емкости водохранилища. Во время эксплуатации ГЭС применение базы данных ДЗЗ позволит увеличить точность прогнозирования естественного притока к створу ГЭС, а также потерь, обусловленных природными факторами. Неполный список задач, решаемых на основе данных ДЗЗ, приведен на рис. 6.

Рассмотрим их более подробно.

1. Одна из важнейших задач на этапе проектирования ГЭС – определение полезного объема водохранилища станции.

Параметры водохранилища напрямую зависят от рельефа местности, а его площадь может простираться на сотни км<sup>2</sup>. Использование информации со спутника быстрее, имеет больший охват территории и зачастую точнее традиционных методов позволяет определить зону затопления водохранилища и рассчитать его характеристики.

Применение ГИС-технологий позволит автоматизировать процесс построения кривой связи между уровнем верхнего бьефа (отметка высоты уровня воды перед створом ГЭС) и объемом (площадью) водохранилища. Данная кривая описывает динамику изменения за-

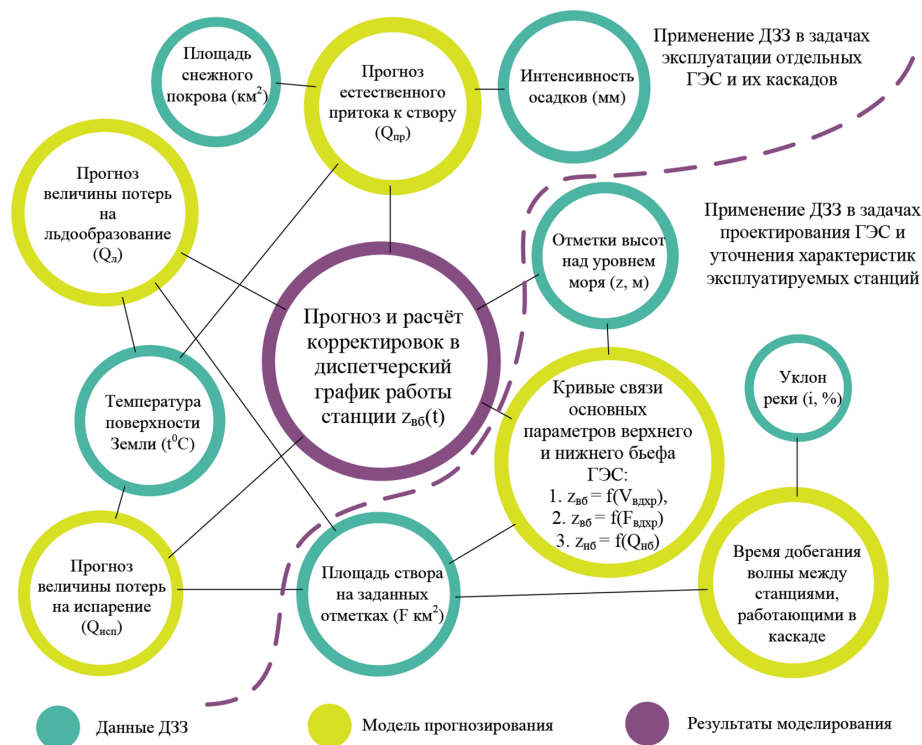


Рис. 6. Список задач, решаемых на основе ДЗЗ

Fig. 6. List of tasks solved on the basis of remote sensing

пасов воды и уровня верхнего бьефа ГЭС. Объем воды, сбрасываемый или запасаемый в водохранилище, определяет уровень расхода воды через ГЭС, что ведет к изменению мощности и количества вырабатываемой электроэнергии. Эксплуатация гидростанции без заранее определенной кривой связи уровня верхнего бьефа и объема водохранилища невозможна.

Аналогично может быть построена кривая связи между уровнем нижнего бьефа и расходом. Пример построения кривых связи верхнего и нижнего бьефов приведен на рис. 7.

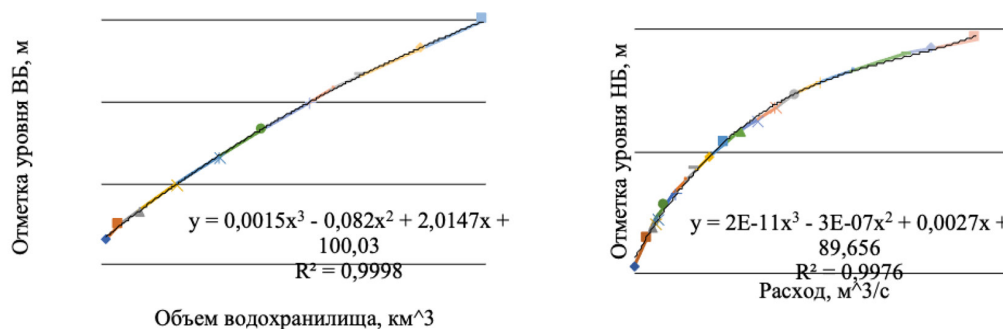


Рис. 7. Кривые связи уровня верхнего и нижнего бьефов на примере Новосибирской ГЭС

Fig. 7. Connection curves of the level of the upper and lower pools on the example of the Novosibirsk HPP

Решение задачи построения кривых связи актуально не только для строящихся гидроэлектростанций. На территории России и стран СНГ имеются гидроэлектростанции, у которых нет точной информации о параметрах собственных водохранилищ, либо данные водохранилищ претерпели изменения за время многолетней эксплуатации. В этом случае мониторинг гидрографических параметров створа позволит скорректировать имеющиеся в распоряжении персонала станции данные, что приведет к повышению эффективности управления режимами станции.

2. Особого внимания также заслуживают данные о кривизне поверхности и расстоянии между станциями. Они могут быть использованы для расчета времени добегания волны от одной ГЭС до другой. Это позволит более точно рассчитывать временные поправки в режиме работы станций, связанных в каскаде. Формула для расчета времени добегания волны

$$T_{\text{дон}} = \frac{L}{v}, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между первой и второй ГЭС;  $v$  – скорость потока.

Скорость движения воды напрямую зависит от уклона реки и гидравлического радиуса русла:

$$v = C \cdot \sqrt{R_{cp} \cdot J_{cp}}, \quad (2)$$

где  $C$  – коэффициент скорости;  $R_{cp}$  – средний гидравлический радиус русла реки на участке между гидроэлектростанциями каскада;  $J_{cp}$  – средний уклон реки.

3. На этапе эксплуатации ГЭС особую роль играют задачи краткосрочного и долгосрочного планирования режимов ГЭС. В основе планирования режима лежит прогноз изменения параметров стока, основанный на выявлении закономерностей изменения природных факторов в рамках рассматриваемого интервала времени с применением базы статистической информации за предыдущие этапы наблюдений.

Так, на основе данных о запасах снежного покрова и изменениях температуры в течение года может быть построена модель прогнозирования притока к створу водохранилища. Данные об изменении площади водохранилища и температуры окружающей среды могут быть использованы для расчета потерь на испарение и льдообразование. Для расчета средних потерь воды на льдообразование можно использовать выражение

$$\Delta \bar{Q}_l = \gamma_l \sum_{i=1}^n h_{li} \cdot (F_{\text{ипл}} - F_{\text{об.и}}) / t_z, \quad (3)$$

где  $h_l$  – толщина льда;  $\gamma_l = 0,9$  – плотность льда;  $F$  – площадь водохранилища при различных отметках;  $t_z$  – продолжительность зимнего периода, определяемая периодом сработки водохранилища.

Потери воды на испарение определяются по формуле

$$\Delta \bar{Q}_{\text{исп}} = \sum_{i=1}^n (h_{\text{ei}} - h_{\text{ci}}) \cdot F_{\text{ei}} / t_{\text{исп}}, \quad (4)$$

где  $(h_{ei} - h_{ci})$  – дополнительный слой испарения, определяемый разностью слоев испарения с поверхности воды зеркала водохранилища  $h_{ei}$  и с поверхности суши  $h_{ci}$ , затопленной водохранилищем;  $t_{исп}$  – период испарения, обычно соответствующий периоду открытого русла.

Полученные данные используют для корректировки режима работы станции. Алгоритм расчета режимных параметров ГЭС на основе прогноза притока к створу ГЭС и требований энергосистемы представлен на рис. 8.

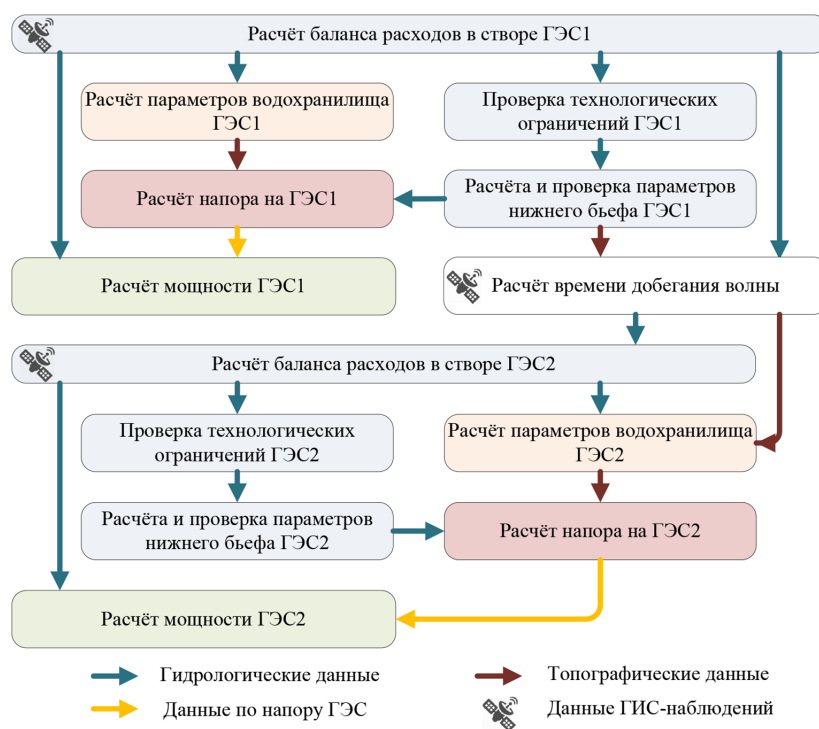


Рис. 8. Алгоритм расчета водно-энергетического режима каскада ГЭС

Fig. 8. The algorithm for calculating the water-energy regime of the cascade of HPP

Рассмотрим основные блоки данного алгоритма более подробно.

#### Блок «Расчет баланса расходов в створе ГЭС»

В данном блоке происходит расчет расхода воды в нижний бьеф через турбины ГЭС и в качестве холостых сбросов, а также задается величина расхода аккумулируемого в водохранилище или забираемого из него. Расчет производится на основе данных о естественном притоке к створу ГЭС и потерь расхода.

Все описанные параметры составляют баланс расходов в створе ГЭС:

$$Q_{об}(t) = Q_{np}(t) \pm Q_{\phi}(t) + Q_{oc}(t) - Q_{исп}(t) \pm Q_{л}(t) - Q_{\phi}(t) - Q_{акк}(t), \quad (5)$$

$$Q_{но}(t) = Q_{ГЭС}(t) + Q_{х.сб}(t), \quad (6)$$

$$Q_{x.cb}(t) = Q_{ГЭС}(t) - Q_{np}(t) \pm Q_{\theta}(t) \pm Q_{л}(t) - Q_{\phi}(t) - Q_{axk}(t), \quad (7)$$

где  $Q_{np}$  – естественный приток к створу ГЭС;  $Q_{\theta}$  – расход водохранилища;  $Q_{oc}$  – осадки на территории водохранилища;  $Q_{исп}$  – испарение с площади водохранилища;  $Q_{л}$  – потери на льдообразование;  $Q_{\phi}$  – фильтрационный расход через основание ГЭС.

Естественный приток нижележащей станции состоит из расхода вышележащей станции, пропущенного через турбины вышележащей станции и боковой приточности:

$$Q_{np, ГЭС2}(t) = Q_{ГЭС1}(t) + Q_{бок. np}(t). \quad (8)$$

Как уже было сказано, такие параметры, как естественный приток, потери на льдообразование и т.д., имеют корреляцию с климатическими параметрами в районе ГЭС. В связи с этим появляется возможность разработки балансовых уравнений расхода для прогнозируемых параметров стока на краткосрочные и долгосрочные периоды времени.

#### Блок «Проверка технологических ограничений ГЭС»

В данном блоке проходит проверка расхода ГЭС на соответствие технологическим и режимным ограничениям.

$$Q_{axk}(t) \leq Q_{ГЭС}(t) \leq Q_{max}. \quad (9)$$

В данном выражении  $Q_{axk}(t)$  – необходимый минимальный расход в нижний бьеф ГЭС для соблюдения требований потребителей водохозяйственного комплекса,  $Q_{max}$  – максимально допустимый расход технологическим ограничениям основного силового оборудования. В частности:

Ограничение по пропускной способности турбины:

$$Q_{max} = n \cdot Q_{maxT} \cdot \sqrt{\frac{H_i}{H_p}}, \quad (10)$$

где  $Q_{maxT}$  – максимальная пропускная способность гидротурбины;  $H_p$  – расчетный напор;  $n$  – число работающих гидроагрегатов.

Ограничение по установленной мощности генератора:

$$Q_{max} = n \cdot \frac{N_{номГА}}{9,81 \cdot \eta_T \eta_G \eta_{BC} \cdot H_i}, \quad (11)$$

где  $N_{номГА}$  – номинальная мощность гидроагрегата;  $\eta_T \eta_G \eta_{BC}$  – КПД турбины, генератора и водопроводящих сооружений.

#### Блок «Расчет и проверка параметров нижнего бьефа ГЭС»

В данном блоке происходит определение отметки нижнего бьефа в зависимости от суммарного расхода, пропускаемого через гидроагрегаты ГЭС и водосбросные сооружения плотины. Расчет производится на основе зависимости  $Z_{нб} f(Q_{нб})$ , представленной на рис. 7.

#### Блок «Расчет параметров водохранилища ГЭС»

В данном блоке определяют отметку верхнего бьефа в зависимости от запасенного объема стока.

Объем, запаасаемый в водохранилище или забираемый из него, определяется величиной расхода  $Q_e$ :

$$V_B = V_B(\text{УМО}) \pm \int Q_e dt. \quad (12)$$

Расчет производится на основе зависимости  $Z_{об}f(V_e)$ , представленной на рис. 7.

Также в блоке проверяется соблюдение всех ограничений, накладываемых на верхний бьеф водохранилища:

$$Z_{УМО} \leq Z_{об} \leq Z_{НПУ}, \quad (13)$$

$$Z_{обMin} \leq Z_{обi} \leq Z_{обMax}, \quad (14)$$

где  $Z_{обMin}$  – минимальный уровень верхнего бьефа, обусловленный ограничением по гарантированной мощности;  $Z_{обMax}$  – максимальный уровень верхнего бьефа, обусловленный требованиями к оптимальному распределению ресурсов водохранилища при долгосрочном планировании.

#### Блок «Расчет напора на ГЭС»

Напор на ГЭС определяется как разница между уровнем верхнего и нижнего бьефа с учетом потерь в водоподводящих сооружениях:

$$H = Z_{об} - Z_{нб} - \Delta h. \quad (15)$$

В блоке расчета напора на ГЭС 2 также учитывается время добегания расхода от первой ГЭС до второй, что напрямую влияет на уровень верхнего бьефа второй ГЭС.

$$H_{ГЭС2} = Z_{нб.ГЭС1}(t - T_{доб}) - Z_{нб.ГЭС2}(t) - \Delta h_{ГЭС2}. \quad (16)$$

#### Блок «Расчет мощности ГЭС»

Расчет мощности производится на основе параметров расхода ГЭС и напора, а также КПД основного силового оборудования станции:

$$N_{гэс} = 9,81HQ_{гэс}\eta_{г}\eta_{гвс}. \quad (17)$$

#### Блок «Расчет времени добегания волны»

В данном блоке производится расчет времени добегания волны от вышестоящей ГЭС 1 до ГЭС 2.

$$T_{доб} = \frac{L \cdot \sum R_i \cdot m + L \cdot m^2 \cdot n}{0,87 \cdot \left(\sum R_i\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\sum J_i\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (18)$$

где  $R_i$  и  $J_i$  – гидравлический радиус и уклон участка реки;  $L$  – расстояние между ГЭС.

Применение системы ГИС-мониторинга позволяет точно определить географические параметры русла реки между станциями, что дает возможность повысить точность расчета времени добегания и исключить ошибки в расчетах режима нижележащей ГЭС.



### Заключение

Планирование долгосрочных и краткосрочных режимов работы электроэнергетических систем с большой долей гидрогенерации неразрывно связано с водно-энергетическим расчетом. Повысить эффективность планов возможно при корректном учете климатических и географических параметров за счет использования ГИС-мониторинга. Создание имитационной модели каскада гидроэлектростанций с интеграцией данных дистанционного зондирования Земли дает преимущества в расчете актуальных параметров ГЭС.

### Список литературы / References

- [1] Егоров М.В., Протопопова Т.Н. Имитационное моделирование оперативного водно-энергетического баланса ГЭС волжско-камского каскада, *Энергия единой сети*, 2013, 1, 40-49. [Egorov M.V. Protopopova T.N. Simulation of the operational water-energy balance of hydroelectric power stations of the Volga-Kama cascade, *Energy of a unified network*, 2013, 1, 40-49 (in Russian)]
- [2] Русина А.Г. ГЭС: Искусство управления. Новосибирск, 2019, 214 с. [Rusina A.G. HPP: The Art of Management. Novosibirsk, 2019, 214 p. (in Russian)]
- [3] Fu B.L. et al. Study on accuracy assessment of DEM in the marsh using with interferometric Palsar, SENTINEL-1A and Terrasar-X images. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, 42, 289-296.
- [4] Panidi E. et al. Mapping of the land cover spatiotemporal characteristics in northern russia caused by climate change. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016, 41, 997–1002, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-997-2016, 2016
- [5] Moscadelli M., Diani M., Corsini G. Temperature-emissivity separation assessment in a sub-urban scenario. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2017, 42, 129–136. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W3-129-2017
- [6] Батчаев М.И., Закинян Р.Г. Математическая модель паводков с распределенными параметрами. *Наука. Инновации. Технологии*, 2018, 1, 95-102 [Batchaev M.I., Zakinyan R.G. Mathematical model of floods with distributed parameters. *Science. Innovation. Technology*, 2018, 1, 95-102 (in Russian)]
- [7] Зиновьев А.Т. и др. Прогнозирование и наблюдения экстремальных весенних половодий и дождевых паводков на Верхней Оби. *Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии*, 2017, 76-87 [Zinoviev A.T. et al. Forecasting and observations of extreme spring floods and rain floods in the Upper Ob. *Water and environmental problems of Siberia and Central Asia*, 2017, 76-87 (in Russian)]
- [8] Grecu M., Olson W.S., Munchak S.J., Ringerud S., Liao L., Haddad Z., Kelley B.L., McLaughlin S.F. The GPM Combined Algorithm. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2016, 33, 2225–2245, DOI:10.1175/JTECH-D-16-0019.1
- [9] Кучмент Л.С. Проблемы выбора моделей формирования стока для решения практических задач. *Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года»*, 2015, 74-80 [Kuchment L.S. Problems of the choice of flow formation models for solving practical problems. *Scientific support for the implementation of the “Water Strategy of the Russian Federation for the period until 2020”*, 2015, 74-80 (in Russian)]
- [10] Hall D.K., Riggs G.A., Solomonson V.V. et al. MODIS snow-cover products. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 83, 181-194.

DOI: 10.17516/1999-494X-0263

УДК 621.879:622.2

## Assessment of Operational Reliability Indicators of Mine Hydraulic Excavators

**Vladimir V. Moskvichev<sup>a\*</sup> and Maksim A. Kovalev<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>Krasnoyarsk Branch Federal Research Center*

*Information and Computing Technologies*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>LLC “MC “Sibanthracite”*

*Novosibirsk, Russian Federation*

Received 07.07.2020, received in revised form 09.08.2020, accepted 28.08.2020

*Abstract.* The results of the reliability indicators study of mine hydraulic excavators in the coal mine «Kolyvansky» of JSC «Siberian Anthracite» are presented. The analysis of the reliability indicators changes of the main equipment assemblies and excavators in general is performed. Quantitative values of the random variables have been determined, and the effectiveness of the existing system for collecting and analyzing information about the excavators reliability has been assessed. The rating of reliable hydraulic excavators in the coal mine «Kolyvansky» has been compiled.

*Keywords:* mining equipment, hydraulic excavators, excavator reliability, mean time to fail, average recovery time, excavator reliability rating.

Citation: Moskvichev V.V., Kovalev M.A. Assessment of operational reliability indicators of mine hydraulic excavators, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 745-756. DOI: 10.17516/1999-494X-0263

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: kovalevmalk@gmail.com

## Оценка показателей эксплуатационной надежности карьерных гидравлических экскаваторов

**В.В. Москвичев<sup>а</sup>, М.А. Ковалев<sup>б</sup>**

<sup>а</sup>*Красноярский филиал  
Федерального исследовательского центра  
информационных и вычислительных технологий  
Российская Федерация, Красноярск*  
<sup>б</sup>*ООО «УК «Сибантрацит»  
Российская Федерация, Новосибирск*

*Аннотация.* Приведены результаты исследования показателей надежности карьерных гидравлических экскаваторов в условиях угольного разреза «Колыванский» АО «Сибирский Антрацит». Выполнен анализ изменения показателей надежности основных групп оборудования и в целом экскаваторов. Определены количественные значения исследуемых случайных величин, оценена эффективность существующей системы сбора и анализа информации о надежности экскаваторов. Составлен рейтинг надежности среди гидравлических экскаваторов, эксплуатируемых в условиях угольного разреза «Колыванский».

*Ключевые слова:* карьерная техника, гидравлические экскаваторы, надежность экскаваторов, наработка на отказ, среднее время восстановления, рейтинг надежности экскаваторов.

Цитирование: Москвичев, В.В. Оценка показателей эксплуатационной надежности карьерных гидравлических экскаваторов / В.В. Москвичев, М.А. Ковалев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 745-756. DOI: 10.17516/1999-494X-0263

### Введение

Горнодобывающая промышленность является одной из основных производственных отраслей России. В 2019 г. объем добычи бурого и каменного угля составил 439,2 млн т, из которых 334,2 млн т (или 76 %) открытым способом; объем вскрышных работ равен 2 248 млн м<sup>3</sup>; объем экспорта по отчетным данным угледобывающих компаний – 192,3 млн т. Несмотря на то что в 2019 г. по сравнению с предыдущими годами отмечено значительное снижение цен на уголь на мировом рынке (на 10-40 % в разные периоды в течение года) [1], приведенные данные свидетельствуют о стабильном развитии горнодобывающей промышленности.

Непрерывное увеличение объемов открытого способа добычи угля сопровождается необходимостью наращивания парка карьерной техники и поддержания ее в работоспособном состоянии. По информации Федеральной службы государственной статистики, степень износа основных фондов предприятий по добыче полезных ископаемых на начало 2019 г. составила по группам: «машины и оборудование» – 64,6 %, «транспортные средства» – 60,4 % [2].

Представленные данные свидетельствуют о повышенном износе парка карьерной техники и его моральном старении. Часть эксплуатируемого парка карьерной техники в РФ создавалась либо в советский период, либо до кризиса 2008-2014 гг. и на текущий момент имеет сверхнормативные сроки службы. В данной ситуации важен анализ эксплуатационных показателей надежности экскаваторов, по результатам которого могут быть выработаны стратегии управ-

Таблица 1. Основные технические параметры КГЭ

Table 1. Main technical parameters of pit hydraulic excavators

Параметры	Bucyrus RH120E	Liebherr ER9250	Liebherr 984C/9100
Исходный объем ковша при 1,8 т/м <sup>3</sup>	15	15	7/7
Максимальная высота среза, м	14,4	12,8	14,75/12,7
Максимальный вылет при копании, м	13,5	13	14,65/13
Максимальная высота разгрузки, м	10,7	11	9,8/8,65
Эксплуатационная масса, тн	287	253,5	119,8/109,6
Давление на грунт, кПа	215	207,9	175,3/139
Скорость перемещения, км/ч	2,7	2,7	2,9/3,5
Максимальное тяговое усилие, кН	1 680	1 210	560/560
Топливный бак, л	5 360	5 440	1 585/1 478
Средняя наработка на 01.01.20, м/ч	47 448	47 302	27 456
Количество эксплуатируемых экскаваторов, ед.	2	3	3

ления парком экскаваторов в целях снижения затрат на их содержание и достижения запланированных объемов выполнения производственной программы.

Анализ эксплуатационных показателей надежности выполнен для карьерных гидравлических экскаваторов (КГЭ), эксплуатируемых АО «Сибирский Антрацит» на Колыванском месторождении Горловского угольного бассейна в Искитимском районе Новосибирской области. Предприятие добывает высококачественный антрацитный уголь категории Ultra High Grade (UHG), запасы которого составляют 132,6 млн т. Месторождение сложено породами кемеровской, ишановской, усятской и алыкаевской свит, в которых сертифицировано 28 угольных пластов. Минимальная мощность пласта простого и сложного строения принята 2 м.

В АО «Сибирский Антрацит» согласно общей классификации экскаваторов, применяемых при добыче полезных ископаемых открытым способом [3, 4], основной экскавационный парк представлен карьерными гидравлическими экскаваторами-лопатами иностранного производства с ковшами вместимостью 7–15 м<sup>3</sup> производства Caterpillar (ранее – Bucyrus) (США), Liebherr (Австрия). Средний возраст парка экскаваторов 8 лет. Основные технические параметры приведены в табл. 1.

### Методика обработки исходной информации

В работе [5], посвященной анализу отказов оборудования и металлоконструкций экскаваторов, выполненной в 1989 г., отмечалось, что действующие в угольной промышленности нормативные документы не способствуют качественному учету условий возникновения отказов. По состоянию на 2020 г. ситуация существенно не изменилась. Основными источниками для получения исходной информации являются отчеты диспетчерских и механических служб, сведения механических служб карьеров о заменах деталей и узлов экскаваторов либо данные эксплуатационных служб сервисных компаний. Существенным недостатком данных источников информации по-прежнему остается возможность предоставления недостоверной информации

о причинах и условиях отказа при передаче ее по цепочке машинист экскаватора – горный диспетчер – отдел главного механика.

Несмотря на то что на протяжении последних 6-8 лет добычные предприятия РФ осуществляют внедрение автоматизированных систем управления горными работами, качественного изменения с точки зрения повышения достоверности учета отказов не произошло. К основным причинам можно отнести незаинтересованность линейного менеджмента на местах в отражении реальной ситуации на горных работах, отсутствие контроля за корректностью работы системы на вышестоящих уровнях, неиспользование количественных данных, получаемых из таких систем, в операционном и бухгалтерском учетах компаний.

В АО «Сибирский Антрацит» проведением крупноузловых ремонтов КГЭ занимаются эксплуатационные службы сервисных компаний. В данной статье при оценке надежности систем и компонентов систем КГЭ использована информация о простоях экскаваторов из отчетов диспетчерских служб компании, включая данные о датах отказа, времени простоя/ликвидации и дополнительные сведения в случае крупных аварий. Отчеты эксплуатационных служб сервисных компаний оказались полезными в части детализации информации по аварийным отказам. Существенной проблемой являлось отсутствие прозрачной системы учета отказов систем и компонентов систем экскаваторов в части фиксации времени наработки (маш. час, м/ч) между отказами. Частично данную информацию удалось получить из отчетов эксплуатационных служб сервисных компаний. Ввиду этого первоначальный период оценки надежности экскаваторов был сокращен с 8 (2012-2019 гг.) до 3 лет (2017-2019 гг.).

Данные о наработках экскаваторов подвергались предварительной обработке. После систематизации статистических данных было проведено их упорядочение во времени, осуществлена сортировка по типам отказов отдельных систем и их компонентов. Для оценки технических возможностей и показателей работы экскаваторов по статистическим данным определены показатели надежности работы в соответствии с [6, 7]: среднее время между отказами – МТБФ, мото. час, среднее время восстановления системы после отказа – МТТР, ч., коэффициент готовности – Кг, вероятность безотказной работы –  $P(t)$ .

### Структура неплановых простоев парка КГЭ

Количество простоев экскаваторов – основная характеристика эффективности использования оборудования, что предопределяет востребованность научно обоснованных мероприятий по управлению надежностью экскаваторов, которые позволили бы гарантированно выполнять планируемые производственные программы и снижать расходы на содержание техники [8].

По результатам анализа работы парка КГЭ установлено, что фактическое время работы за период 2017-2019 гг. по экскаваторам Bucyrus RH120E составило 14 021,76 ч, или 29 % от коэффициента использования календарного фонда времени (КФВ), по экскаваторам Liebherr ER9250 – 38 344,60 ч, или 53 %, по экскаваторам Liebherr R984C/R9100B – 31 235,46 ч или 61 % (Liebherr R984C – 60 %, Liebherr R9100B в 2019 г. – 71 %). Использование КФВ по типам экскаваторов приведено на рис. 1.

Значительное влияние на время простоев экскаваторов оказали неплановые ремонты из-за отказов и аварий механизмов. Для экскаваторов Bucyrus RH120E доля неплановых простоев в КФВ составила 26 %, или 2 610,97 ч., Liebherr R984C/R9100B – 31 %, или 6 266,64 ч. Следует

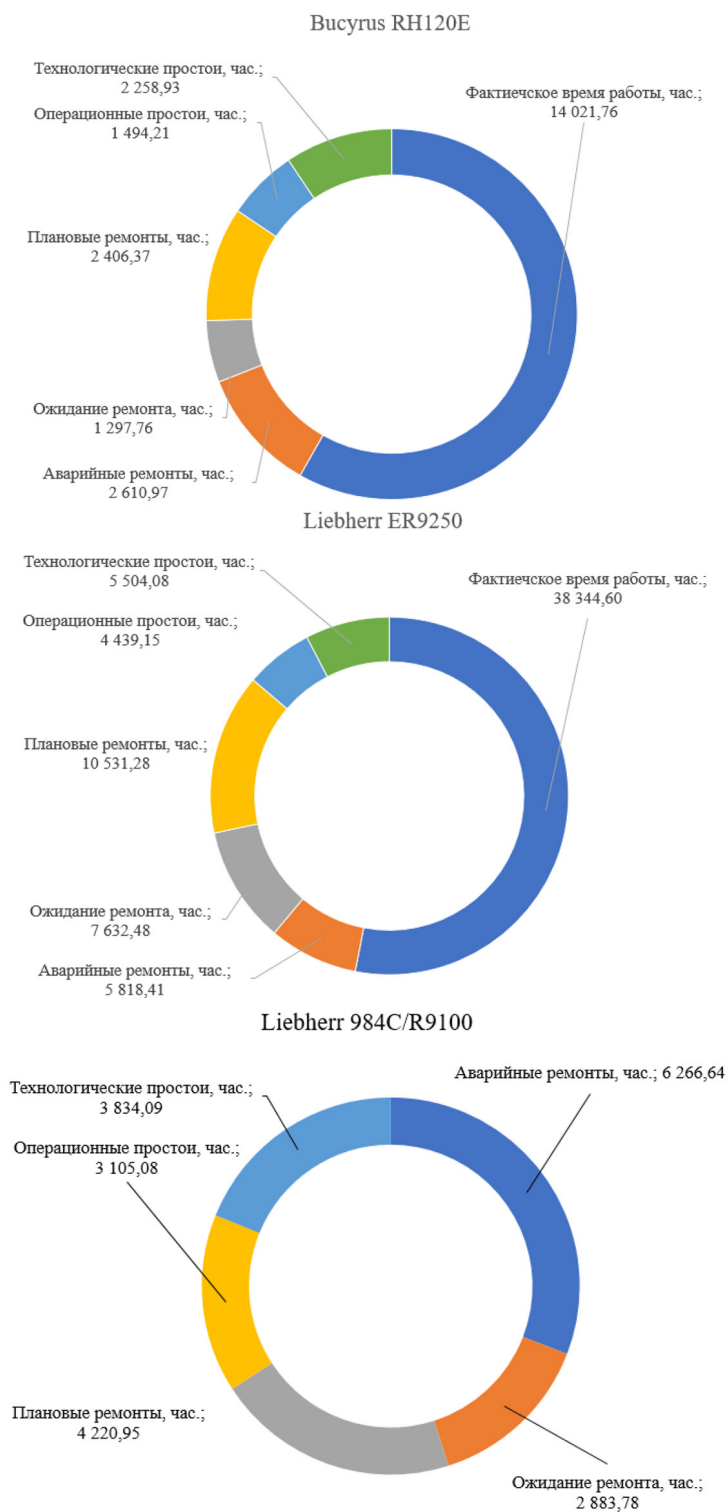


Рис. 1. Использование КФВ экскаваторов Bucyrus RH120E, Liebherr ER9250, R984C/R9100B за период 2012 – 2019 гг.

Fig.1. Use of the Bucyrus RH120E, Liebherr ER9250, R984C/R9100B excavator calendar time fund for the period 2012-2019

обратить внимание, что в структуре простоев экскаваторов Liebherr ER9250 в анализируемом периоде преобладают простои по причине плановых ремонтов (31 % или 10 531,28 ч), что обусловлено проведением среднего и капитального ремонта по двум экскаваторам. Несмотря на это, доля неплановых ремонтов из-за отказов и аварий механизмов также высока и составила 17 %, или 5 818,41 ч.

В статистику неплановых простоев КГЭ АО «Сибирский Антрацит» входят следующие события: отказы и аварии, отказы ЛЭП и отсутствие электроэнергии, отсутствие запасных частей, ожидание ремонтного персонала, отсутствие вспомогательного оборудования/транспорта, климатические и прочие условия, остановки контролирующими органами. В структуре неплановых простоев наибольший удельный вес распределен между следующими событиями: отказы и аварии – 52 %, ожидание ремонтного персонала – 35,8 %, отсутствие запасных частей – 11,1 %. Удельный вес отказов по группам «отказы ЛЭП» и «отсутствие электроэнергии», «климатические и прочие условия», «отсутствие вспомогательного оборудования/транспорта», «остановки контролирующими органами – 1,1 %».

В статистику события «отказы и аварии» включаются простои в связи с отказами основных систем экскаваторов: гидравлическая (ГО), механическая (МО), электрическая (ЭО), двигатель внутреннего сгорания (ДВС), система смазки (СС), а также простои по причинам, оказывающим влияние на восстановление и время нахождения экскаватора в работе: ожидание ремонта (ОР)<sup>1</sup> и внешние причины (ВП)<sup>2</sup>.

Результаты анализа структуры неплановых простоев для различных моделей экскаваторов и структура аварийных простоев парка КГЭ приведены на рис. 2 и табл. 2. В общем количестве отказов по КГЭ наибольший вклад вносят простои из-за отказа гидравлической и электрической систем, составляющие 54 % от их общего количества.

Высокий уровень простоев в ожидании ремонта КГЭ обусловлен непроведением ремонтов в ночную смену, а в дневную смену – ожиданием прибытия сервисных организаций, обслуживающих экскаваторы, простоями по причине отсутствия запасных частей. В условиях угольного разреза «Колыванский» общее время простоев, связанных с отказами вскрышных

Таблица 2. Структура неплановых простоев по системам КГЭ и причинам за 2017-2019 гг.

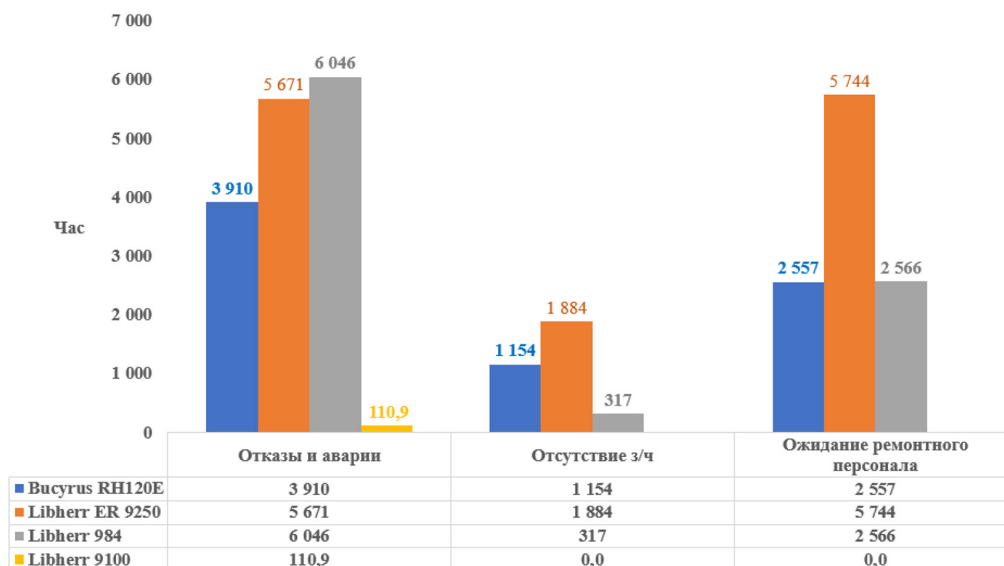
Table 2. Structure of unplanned downtime by pit hydraulic excavator systems and reasons for 2017-2019

№	Категория отказа	Bucyrus RH120E, %	Liebherr ER9250, %	Liebherr R984C, %	Liebherr R9100B, %
1	ГО	19,1	18,9	29,8	32,2
2	МО	12,1	13,3	6,8	5,1
3	ЭО	43,3	39,1	27,7	18,6
4	ДВС	-	-	6	18,6
5	СС	8,8	4,5	9,4	18,6
6	ОР	14	21,5	16,7	3,4
7	ВП	2,7	2,7	3,7	3,4

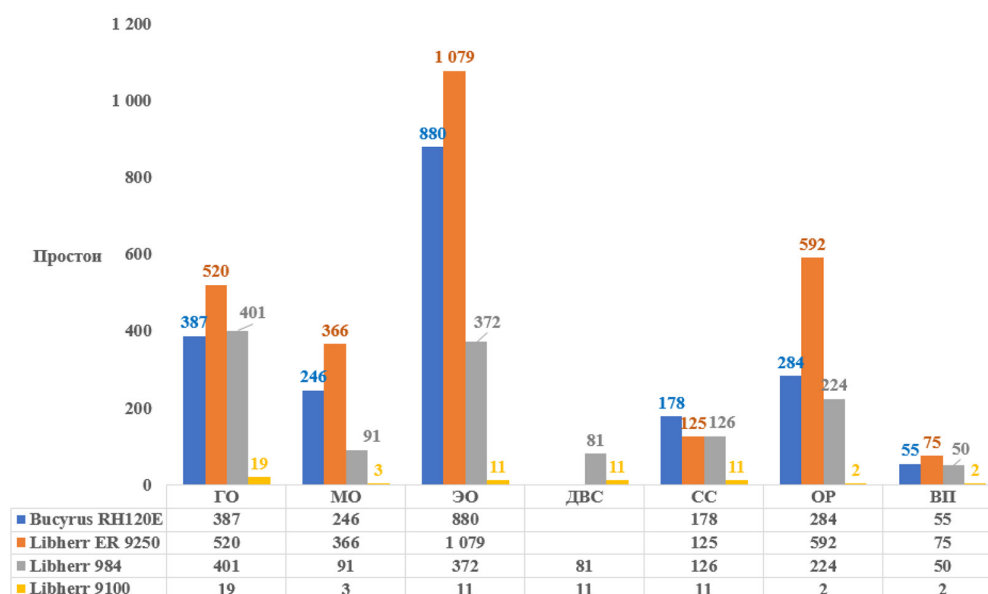
<sup>1</sup> Ожидание ремонта в сервисе, отсутствие ремонтной бригады, отсутствие запасных частей.

<sup>2</sup> Отключение внешнего электроснабжения, климатические условия, остановка контролирующими органами.





а)



б)

Рис. 2. Структура unplanned простоев вследствие аварийности парка КГЭ за 2017–2019 гг. (а). Структура аварийных простоев парка по системам КГЭ и причинам за 2017–2019 гг. (б)

Fig. 2. Structure of unplanned downtime by pit hydraulic excavator systems and reasons for 2017-2019 (а). Structure of emergency downtime of pit hydraulic excavators and equipment for 2017-2019 (б)

экскаваторов в 2019 г., равнялось 11 374 ч. Средняя стоимость одного часа простоя КГЭ на его производительность в 2019 г. рассчитана исходя из прямых затрат (ФОТ персонала, ГСМ/электроэнергия, амортизация, запасные части) и составила у экскаваторов:

Bucyrus RH120E – 6 768,2 руб/час при производительности 325,8 т/ч;

Liebherr ER9250 – 6 643,9 руб/час при производительности 340,9 т/ч;

Liebherr R984C – 5 842,6 руб/час при производительности 186,4 т/ч.

### Статистическая обработка данных о надежности систем и компонентов КГЭ

Два экскаватора Bucyrus RH120E с января 2017 г. по январь 2019 г. в сумме наработали 36 415 м/ч (табл. 3), при этом было зафиксировано 2 030 отказов, в том числе 387 по гидравлическому, 246 по механическому, 880 по электрическому оборудованию, 178 по системе смазки, 284 по ожиданию ремонта и 55 по категории «внешние причины». Средняя наработка двух экскаваторов на отказ составила 17,94 м/ч, а среднее время восстановления – 3,81 ч, что в целом по данной группе экскаваторов обеспечило их готовность к эксплуатации около 82,5 %. Безусловная вероятность того, что в интервале наработок от 0 до 10 м/ч (расчетное время рабочей смены) не наступит отказ по группе экскаваторов Bucyrus RH120E №21, №22, равна  $P(t) = 0,57$  (57 %).

Из данных табл. 3 следует, что наименьшее суммарное время простоев (595,3 и 1 033 м/ч) и наибольшую наработку на отказ (204,6 и 148,03 м/ч) имеют система смазки и механическое оборудование, но при этом они требуют наибольших средних затрат времени на восстановление: 3,34 и 4,2 ч соответственно. Отдельно хотелось бы отметить группу «ожидание ремонта», которая в структуре простоев имеет наибольший удельный вес (48 %), время восстановления по этой группе составляет 13,03 ч. В 2019 г. по группе «ожидание ремонтов» зафиксировано 117 отказов, общее время восстановления по которым 1 546 ч, из которых 1 093 ч по причине отсутствия ремонтной бригады, 453,5 ч по причине отсутствия запасных частей. При средней стоимости 1-го часа отказа для данной группы экскаваторов 6 768,2 руб. простои по ожиданию ремонтной бригады стоили для компании 7,4 млн руб., простои по отсутствию запасных частей – 3,1 млн руб.

Три экскаватора Liebherr ER9250 в сумме наработали 48 445 м/ч (табл. 4), при этом было зафиксировано 2 757 отказов, в том числе 520 по гидравлическому, 366 по механическому, 1 079 по электрическому оборудованию, 125 по системе смазки, 592 по ожиданию ремонта и 75 по категории «внешние причины». Средняя наработка трех экскаваторов на отказ равняется

Таблица 3. Основные характеристики показателей надежности экскаватора Bucyrus RH120E

Table 3. Main characteristics of Bucyrus RH120E excavator reliability indicators

Категория	Кол-во отказов	Нарботка всего, м/ч	Время простоев на восстановление, ч	MTBF, м/ч	MTTR, ч	Кг 2017-2019 гг., %	P(t)
ГО	387	36 415	1 289,51	94,1	3,33	96,58	0,90
МО	246		1 033,15	148,03	4,2	97,2	0,93
ЭО	880		1 003,33	41,38	1,14	97,3	0,79
СС	178		595,28	204,58	3,34	98,4	0,95
ОР	284		3 700,08	128,22	13,03	90,8	0,92
ВП	55		103,82	662,09	1,89	99,7	0,99
Итого	2 030	36 415	7 725,17	17,94	3,81	82,5	0,57

Таблица 4. Основные характеристики показателей надежности экскаватора Liebherr ER9250

Table 4. Main characteristics of Liebherr ER9250 excavator reliability indicators

Категория	Кол-во отказов	Наработка всего, м/ч	Время простоев на восстановление, ч	MTBF, м/ч	MTTR, ч	Кг 2017-2019 гг., %	P(t)
ГО	520	48 445	1 677,02	93,16	3,23	96,7	0,9
МО	366		2 376,38	132,36	6,49	95,3	0,93
ЭО	1 079		1 346,71	44,9	1,25	97,3	0,8
СС	125		286,43	387,56	2,29	99,4	0,97
ОР	592		7 613,68	81,83	12,86	86,4	0,88
ВП	75		131,87	645,93	1,76	99,7	0,98
Итого	2 757	48 445	13 432,09	17,57	4,87	78,3	0,56

17,57 м/ч, а среднее время восстановления – 4,87 ч, что в целом по данной группе экскаваторов обеспечило их готовность к эксплуатации около 78,3 %. Безусловная вероятность того, что в интервале от 0 до 10 м/ч (расчетное время рабочей смены) не наступит отказ по группе экскаваторов Liebherr ER9250 №19, №20, №23, составляет  $P(t) = 0,56$  (56 %). Наименьшее суммарное время простоев (286,4 и 1 347 ч) приходится на группы «система смазки» и «электрическое оборудование». Наибольшую наработку на отказ (387,6 и 132,4 м/ч) имеют система смазки и механическое оборудование, как следствие, у данных систем самый высокий коэффициент готовности. При этом наибольших средних затрат времени на восстановление требует механическое оборудование – 6,5 ч – и гидравлическая система – 3,23 ч, несмотря на то, что у гидравлической системы довольно высокая наработка на отказ. Группа «ожидание ремонта» в структуре простоев имеет удельный вес (21 %), и время восстановления по этой группе равно 12,86 ч. В 2019 г. по группе «ожидание ремонтов» зафиксировано 240 отказов, общее время восстановления по которым составило 2 943 ч, из которых 2 676 ч по причине отсутствия ремонтной бригады, 267,1 ч по причине отсутствия запасных частей. При средней стоимости 1-го часа отказа для данной группы экскаваторов 6 643,9 руб. простои по ожиданию ремонтной бригады стоили для компании 17,8 млн руб., простои по отсутствию запасных частей – 1,8 млн руб.

Два экскаватора Liebherr R984C с января 2017 г. по январь 2019 г. в сумме наработали 40 210 м/ч (табл. 5), при этом было зафиксировано 1 689 отказов, в том числе 503 по гидравлическому, 449 по механическому, 117 по электрическому оборудованию, 169 по системе смазки, 146 по системе двигателя внутреннего сгорания, 248 по ожиданию ремонта и 157 по категории «внешние причины». Средняя наработка двух экскаваторов на отказ составила 23,81 м/ч, а среднее время восстановления – 5,35 ч., что в целом по данной группе экскаваторов обеспечило их готовность к эксплуатации около 81,7 %. Безусловная вероятность того, что в интервале от 0 до 10 м/ч (расчетное время рабочей смены) не наступит отказ по группе экскаваторов Liebherr R984C №26, №28, составляет  $P(t) = 0,66$  (66 %). Из данных табл. 5 следует, что наименьшее суммарное время простоев (352 ч) и наибольшую наработку на отказ (343,7 м/ч) имеет электрическое оборудование. При этом наибольших средних затрат времени на восстановление требует группа ДВС (9,6 ч). У экскаваторов Liebherr R984C самое высокое значение времени восстанов-

Таблица 5. Основные характеристики показателей надежности экскаватора Liebherr R984C

Table 5. Main characteristics of Liebherr R984C excavator reliability indicators

Категория	Кол-во отказов	Наработка всего, м/ч	Время простоев на восстановление, ч	MTBF, м/ч	MTTR, ч	Кг 2017-2019 гг., %	P(t)
ГО	146	40 210	1 407	275,41	9,64	96,6	0,96
ДВС	449		2 027	89,55	4,52	95,2	0,89
МО	117		352	343,68	3,01	99,1	0,97
ЭО	169		449	237,93	2,66	98,9	0,96
СС	248		2 883	162,14	11,63	93,3	0,94
ОР	157		95	705,44	1,66	99,8	0,99
ВП	146		1 407	275,41	9,64	96,6	0,96
Итого	1 689	40 210	9 036,47	23,81	5,35	81,7	0,66

ления составило 11,63 ч по группе «ожидание ремонта». В 2019 г. по группе «ожидание ремонта» зафиксировано 118 отказов, общее время восстановления по которым равнялось 1 406 ч, из которых 1 269,27 ч по причине отсутствия ремонтной бригады, 136,50 ч по причине отсутствия запасных частей. При средней стоимости 1-го часа отказа для данной группы экскаваторов 5 311,46 руб. простои по ожиданию ремонтной бригады стоили для компании 6,7 млн руб., простои по отсутствию запасных частей – 725 тыс. руб.

### Заключение

1. По результатам анализа показателей надежности систем и компонентов КГЭ установлено, что среди экскаваторов с ковшем 15 м<sup>3</sup> более высокий индекс надежности имеет экскаватор марки Viscugus RH120E. По сравнению с экскаваторами марки Liebherr ER 9250 у экскаваторов Viscugus RH120 меньшее время простоев на восстановление – 7 725,17 часа к 13 432 часа, более высокий индекс наработки на отказ – 17,94 к 17,57 м/ч и меньший индекс среднего времени на восстановление – 3,81 к 4,87 ч. Как следствие, коэффициент готовности Viscugus RH120E составил 82,5 %, а Liebherr ER 9250 – 78,3 %, а безусловная вероятность того, что в интервале от 0 до 10 м/ч не наступит отказ по экскаватору Viscugus RH120, равна P(t) = 0,573 (57 %) при 0,566 (56 %) у Liebherr ER 9250.

Индекс надежности экскаваторов с ковшем 7 м<sup>3</sup> марки Liebherr R984C составляет P(t) = 0,66 (66 %) при коэффициенте готовности 81,7 %. Время простоев на восстановление равно 9 036,47 ч, что ниже, чем у Viscugus RH120E. При этом наработка на отказ составляет 23,81 м/ч, что выше, чем у экскаваторов с объемом ковша 15 м<sup>3</sup>. Рейтинг надежности среди гидравлических экскаваторов, эксплуатируемых в условиях угольного разреза «Колыванский», отражен в табл. 6.

2. Высокий уровень unplanned простоев экскаваторов приводит к ощутимым затратам, что обусловлено не только снижением объема экскавации угля и породы, но и ростом издержек на проведение ремонтов. В 2019 г. по группе «ожидание ремонтов» всего зафиксировано 475 отказов. Разрез «Колыванский» понес издержки по причине простоев в ожидании ремонтной

Таблица 6. Рейтинг надежности основных групп оборудования КГЭ

Table 6. Reliability rating of the main groups of equipment for pit hydraulic excavators

Экскаватор	Вероятность безотказной работы за 10 м/ч для групп оборудования			
	ГО	МО	ЭО	СС
Вусугус RH120E (15 м³)	0,899	0,935	0,785	0,952
Liebherr ER9250 (15 м³)	0,898	0,927	0,800	0,975
Liebherr R984C (7 м³)	0,885	0,898	0,970	0,959

бригады в размере 31,9 млн руб., издержки по причине простоев по отсутствию запасных частей 5,6 млн руб.

Снижение издержек по данной группе можно достигнуть за счет организации проведения ремонтно-восстановительных работ в ночную смену (сокращение сменного простоя), размещения специалистов сервисных организаций в границах ведения горных работ (сокращение времени прибытия сервисных специалистов на разрез), внедрения политики планирования и проведения ремонтов, обеспечивающей своевременную замену расходных и изнашивающихся элементов, для достижения заданных сроков эксплуатации экскаваторов и определения срока службы до списания.

3. Таким образом, по результатам анализа показателей эксплуатационной надежности карьерных гидравлических экскаваторов выявлены «узкие места» в процессе управления парком экскаваторов в условиях угольного разреза «Колыванский», заключающиеся:

- в необходимости сокращения простоев по группе «ожидание ремонтов». Экономический эффект от реализации данного мероприятия будет выражаться в сокращении прямых затрат на содержание экскаваторов, а также в повышении их производительности;
- в выявлении наиболее проблемных групп оборудования для моделей экскаваторов, требующих пересмотра текущей стратегии управления ремонтами в целях повышения их отказоустойчивости.

### Список литературы / References

- [1] Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь -декабрь 2020 года. *Уголь*, 2020, 3, 54-69. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-3-54-69. [Tarazanov I., Gubanov D. Results of the Russian coal industry in January-December 2020, *Coal*, 2020, 3, 54-69 (in Russian)].
- [2] Федеральная служба государственной статистики. *Российский статистический ежегодник. 2019 г.* URL: <https://www.gks.ru/>. [Federal state statistics service. *Russian statistical Yearbook, 2019*. URL: <https://www.gks.ru/> (in Russian)].
- [3] Домбровский Н.Г. *Экскаваторы. Общие вопросы теории, проектирования и применения*. М.: Машиностроение, 1962. 318 с. [Dombrowski N.G. *The excavators. General questions of theory, design and application*. Moscow, Mashinostroenie, 1962. 318 p. (in Russian)].
- [4] Подэрни Р.Ю. *Горные машины и комплексы для открытых работ*. М.: Недра, 1985. 544 с. [Poderni R. *Mining machines and complexes for open works*. Moscow, Nedra, 1985. 544 p. (in Russian)].

- [5] *Анализ отказов механического оборудования и металлоконструкций экскаваторов.* Москвичев В.В., Доронин С.В., Утехин С.А. Эбич В.Р. Красноярск: ВЦ СО АН СССР, 1989. 33 с. [*Analysis of failures of mechanical equipment and metal structures of excavators.* Moskvichev V., Doronin S., Utekhin S., Ebich V. Krasnoyarsk: VTS SO AN USSR, 1989. 33 p. (in Russian)].
- [6] ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. Введ. № 2017-03-01. М.: Стандартинформ, 2016. 22 с. [GOST 27.002-2015 Reliability in engineering (SSNT). Terms and definitions. No. 2017-03-01. Moscow: standardinform, 2016. 22 p. (in Russian)].
- [7] Торелл В., Авелер В. Среднее время между отказами: описание, стандарты. Информационная статья № 72, APC, Legendary Reliability. [Torell V., Aveler V., Average time between failures: description, standards. Information article # 72, APC, Legendary Reliability (in Russian)].
- [8] Богомолов И.Д., Буянкин П.В. Состояние рабочего оборудования экскаваторного парка Кузбасса. *Сборник лучших докладов студентов и аспирантов Кузбасского государственного технического университета по результатам юбилейной 50-й научно-практической конференции*, ГУ КузГТУ, 18–23 апр. 2005. Кемерово, 2005, 79–81. [Bogomolov I.D., Buyankin P.V. State of the working equipment of the Kuzbass excavator Park. *Collection of the best reports of students and postgraduates of the Kuzbass state technical University on the results of the 50th anniversary scientific and practical conference*, GU KuzSTU, 18-23 APR. 2005. Kemerovo, 2005, 79-81 (in Russian)].

DOI: 10.17516/1999-494X-0264

УДК 528.8

## **Temperature Dynamics Assessment of Agricultural Objects Based on Unmanned Aircraft Data**

**Dmitry V. Emelyanov\*, Irina Y. Botvich,  
Nikita O. Malchikov and Anatoly P. Shevyrnogov**

*Institute of Biophysics SB RAS  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 03.08.2020, received in revised form 21.08.2020, accepted 10.09.2020

*Abstract.* During the study, the spatial and temporal distribution of radiant temperature of agricultural fields has been made. The object of the study is agricultural fields (barley, oats, fallow field, perennial grasses (*Onobrychis*)), located on the territory of the Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture of the FRC KSC SB RAS near the village of Minino (Central Siberia, Krasnoyarsk region). The radiant temperature measurement of objects surface was taken by the ZENMUSE XT2 camera installed on the unmanned aircraft DJI Matrice 210 RTK V2. The spatial resolution of the obtained thermal maps is 12 – 14 cm. The state of the objects (the presence of vegetation cover) was assessed using the NDVI values obtained from the PlanetScope satellite data with a spatial resolution of 3 meters. It was established that the presence of plants and the size of their projective cover are decisive in the formation of soil cover temperature conditions. The growth and development of the vegetation cover, its height and closeness, change the temperature regime conditions. Instead of a soil, vegetation cover becomes an active surface. The thermal maps (spatial distribution of radiant temperature) of the agricultural land surface has been carried out, which makes it possible to assess the in-field temperature heterogeneity of the objects.

*Keywords:* radiation temperature, agricultural fields, thermal map, ZENMUSE X5S, ZENMUSE XT2.

Citation: Emelyanov D.V., Botvich I.Y., Malchikov N.O., Shevyrnogov A.P. Temperature dynamics assessment of agricultural objects based on unmanned aircraft data, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 757-765. DOI: 10.17516/1999-494X-0264

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: dima9526@gmail.com



## **Оценка динамики температур сельскохозяйственных объектов по данным беспилотных воздушных судов**

**Д.В. Емельянов, И.Ю. Ботвич,  
Н.О. Мальчиков, А.П. Шевырных**  
*Институт биофизики СО РАН  
Российская Федерация, Красноярск*

*Аннотация.* В ходе проведенного исследования выполнена оценка пространственного и временного распределения радиационной температуры сельскохозяйственных угодий. Объектом исследования являются сельскохозяйственные угодья (посев ячменя, посев овса, паровое поле, посев многолетних трав (эспарцет)), расположенные на территории Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН вблизи пос. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край). Измерение радиационной температуры поверхности исследуемых объектов выполнено камерой ZENMUSE XT2, установленной на беспилотном воздушном судне DJI Matrice 210 RTK V2. Пространственное разрешение полученных термокарт составляет 12–14 см. Оценку состояния исследуемых объектов (наличие растительного покрова) проводили по значениям NDVI, полученных по спутниковым данным PlanetScope с пространственным разрешением 3 м. Установлено, что присутствие растений и величина их проективного покрытия являются определяющими в формировании температурных условий почвенного покрова. Рост и развитие растительного покрова, его высота и сомкнутость изменяют условия температурного режима. Деятельной поверхностью становится не почва, а растительный покров. Проведено построение термокарт (пространственного распределения радиационной температуры) поверхности сельскохозяйственных угодий, что позволяет оценивать внутрипольную неоднородность температуры исследуемых объектов.

*Ключевые слова:* радиационная температура, сельскохозяйственные угодья, термокарта, ZENMUSE X5S, ZENMUSE XT2.

Цитирование: Емельянов, Д.В. Оценка динамики температур сельскохозяйственных объектов по данным беспилотных воздушных судов / Д.В. Емельянов, И.Ю. Ботвич, Н.О. Мальчиков, А.П. Шевырных // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 757-765. DOI: 10.17516/1999-494X-0264

### **Введение**

Знания о динамике радиационной температуры сельскохозяйственных угодий несут в себе огромный потенциал. Регулярный мониторинг радиационной температуры угодий позволяет получить информацию для оценки состояния сельскохозяйственных посевов.

Информация такого типа дает возможность оценивать индекс засухи, влажность почв, которая может использоваться для планирования орошения, определить процент всхожести посевов, выделить зоны с повышенной и пониженной температурой. Она может быть полезна для оценки состояния всходов, выполнения картирования структуры почв. Регулярно получаемая информация о состоянии радиационной температуры посевов дает возможность выделить этапы созревания зерновых культур, что позволяет определить оптимальное время для его сбора [1-4].

Однако на текущий момент подавляющее количество информации о состоянии температур различных объектов, включая сельскохозяйственные угодья, идет со спутниковых носи-

телей, которые имеют большой недостаток – низкое пространственное разрешение. Например, спутники серии MODIS TERRA имеют пространственное разрешение в тепловом диапазоне около 1000 м, Landsat-8 – около 100 м. Данные с таким пространственным разрешением применимы на региональном и федеральном уровнях, но не могут дать полноценной картины о состоянии радиационной температуры полей на уровне отдельных хозяйств [5-7].

Поэтому для мониторинга сельскохозяйственных угодий на локальном уровне предложено применять беспилотные воздушные суда (БВС) со специализированным типом полезной нагрузки – тепловизионными камерами. Например, БВС DJI Matrice 210 RTK V2 с полезной нагрузкой в виде тепловизионной камеры Zenmuse XT2 позволяет получать карты радиационной температуры с пространственным разрешением вплоть до 2-3 см и использовать потенциал получаемых данных о состоянии радиационной температуры сельскохозяйственных угодий в полной мере.

**Цель исследования** – оценка пространственного и временного распределения радиационной температуры сельскохозяйственных угодий.

### Материалы и методы исследований

Объектом исследования являются сельскохозяйственные угодья на территории Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН вблизи пос. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край). Исследования проведены на следующих тестовых участках: посев ячменя, посев овса, паровое поле, посев многолетних трав (эспарцет) (рис. 1). Посев ячменя производили при глубинной обработке почвы. Посев овса выполнен без обработки почвы, в связи с чем отмечено присутствие большого количества стерни на поверхности почвы. Тестовые участки расположены в непосредственной близости друг от друга, что обеспечивает одинаковое влияние метеоусловий на исследуемые объекты.

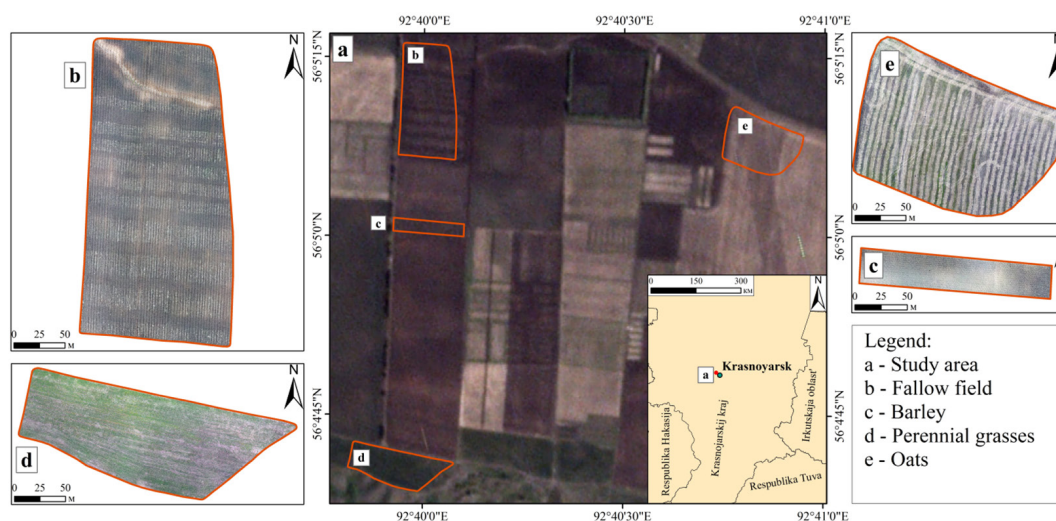


Рис. 1. Карта расположения тестовых участков. В качестве базовой карты использовано изображение, полученное по данным PlanetScope от 24 мая 2020 г.

Fig. 1. The map of study. The basemap is an image from PlanetScope (May 24, 2020)

Работа основывается на данных с беспилотного воздушного судна DJI Matrice 210 RTK V2 с полезной нагрузкой в виде камер ZENMUSE X5S и ZENMUSE XT2. БВС имеет систему RTK, которая позволяет достигать точности географической привязки до 2 см.

Камера ZENMUSE X5S дает возможность получать цифровые изображения с разрешением 5120x2880 пикселей, что помогает достигать высокой детализации изображения с больших высот. На основе полученных данных произведено построение 3D-модели местности. Это предоставляет такую информацию, как высота объектов (в том числе растений), состояние рельефа и т.д.

Камера ZENMUSE XT позволяет вести съемку в тепловом диапазоне 7.5-13.5  $\mu\text{m}$  с разрешением 640x512 пикселей.

Перед совершением полетов над тестовыми участками был проведен ряд подготовительных мероприятий: получение разрешения на выполнения полетов в Новосибирском зональном центре и главном центре ЕС ОрВД (установление временного режима); рекогносцировка на местности и выбор высоты полета (с целью исключения чрезвычайных ситуаций).

Перед непосредственным запуском БВС и съемкой на местности устанавливали наземную станцию DJI ID-RTK 2 for Matrice series. Совместная работа данной наземной станции и БВС позволяет получать снимки с точностью координатной привязки равной 1,5 – 2 см.

Для выполнения съемки и получения корректных данных использованы специализированные программные средства: DJI Pilot и Pix4DMapper.

Программу DJI Pilot применяли для составления полетного задания. При использовании камеры ZENMUSE X5S в качестве входных параметров выбрано продольное и поперечное перекрытие снимков – 80 и 70 % соответственно, высота полета – 100 метров от точки взлета, съемка проводилась в надир. Пространственное разрешение полученных изображений составляет 2 – 4 см.

При использовании камеры ZENMUSE XT2 в качестве входных параметров выбрано продольное и поперечное перекрытие снимков – 80 и 70 %, соответственно, высота полета – 100 м



Рис. 2. DJI Marice 210 RTKV2 с полезной нагрузкой в виде камеры ZENMUSE XT2

Fig. 2. DJI Marice 210 RTKV2 with ZENMUSE XT2 camera payload

от точки взлета, съемка проводилась в нади́р. Пространственное разрешение полученных изображений составляет 12–14 см.

После завершения всех подготовительных этапов начинали процесс непосредственной съемки, выполнения полетного задания, во время которого были отключены функции автоматической фокусировки камеры и калибровки камеры по температуре во избежание получения искажения изображений (данные процедуры выполняли единожды при наборе рабочей высоты). Радиационную температуру объектов измеряли с 11 до 14 ч местного времени.

Обработку данных, полученных ZENMUSE XT2 и ZENMUSE X5S, выполняли в Pix4DMapper. Данное программное обеспечение позволяет составлять ортофотопланы из различных наборов и типов данных (спектральные, RGB-снимки, снимки с тепловых камер) в автоматическом режиме. Для обработки снимков с камеры Zenmuse XT2 установлен режим «Thermal camera», выполнение которого позволяет получить температурную карту местности.

Оценка состояния исследуемых объектов (наличие растительного покрова) проведена по спутниковым данным PlanetScope с пространственным разрешением 3 м. На этапе предварительной обработки осуществляли атмосферную коррекцию данных PlanetScope. Корректирующие коэффициенты для каждого канала присутствуют в метаданных каждой сцены.

В ходе тематической обработки спутниковой информации производился расчет значений NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [8]. Расчет NDVI базируется на данных красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) диапазонов оптического спектра:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}. \quad (1)$$

### Результаты исследований

На лишенных растительного покрова поверхностях горных пород и почв радиационная температура определяется их вещественным составом. Температурные характеристики почв определяются, прежде всего, их цветом, составом и объемной долей минералов в ее составе, размером частиц почвы, содержанием органического вещества, пористостью и влажностью. Наличие на поверхности почвы растительного покрова вносит значительные изменения в температурный режим. Вид растительности, высота, мощность крон и густота растительного покрова определяют то количество солнечной радиации, которое достигает поверхности почвы [9]. Часть падающей на листья солнечной радиации отражается от листовой поверхности и снова уходит в атмосферу, часть – поглощается листьями, расходуется на фотосинтез и в значительной мере на процесс испарения, часть – проходит через травостой и идет на нагрев почвы [10]. Таким образом, регистрируемая радиационная температура является результатом баланса тепловых потоков с учетом процессов внутри листовой массы и отражения от поверхности почвы.

В начале вегетационного периода радиационная температура почвы посева не отличается от температуры парового поля при одинаковом способе обработки. Посев ячменя, так же как и паровое поле, производили при глубинной обработке почвы. В связи с этим наибольшие отличия в значениях температуры проявились 11 июня 2020 г., когда значение NDVI поля ячменя достигло 0.47 (NDVI парового поля 0.18) (рис. 3-5).

Посев овса производили без обработки почвы (технология No-Till). Поэтому на момент посева на поверхности почвы присутствовало большое количество стерни. Сев овса был выполнен на 12 дней позже посева ячменя. Значения NDVI овса начиная с конца мая значительно ниже значений NDVI ячменя (на 0.24 – 11 июня, 0.19 – 1 июля). Низкое проективное покрытие посева овса определило и более высокие значения измеряемой радиационной температуры. При максимальных значениях NDVI (1 июля) средняя температура овса больше температуры ячменя на 6.3 °C.

Наиболее отличным от посевов зерновых культур объектом исследования являются многолетние травы. Растительность этого вида начинает свой рост и развитие ранней весной с наступлением первых положительных температур. 15 мая значения NDVI составили 0.4, что свидетельствует о наличии значительного количества зеленой фитомассы. При этом температура этого растительного покрова равнялась 6.4 °C и была минимальной по сравнению с температурой посевов овса и ячменя. На момент проведения исследования всходы на посевах отсутствовали и значения NDVI посевов составляли 0.15 и 0.09. Последующий рост растительности посевов приводит к увеличению сомкнутости полога и уменьшению влияния почв при формировании радиационной температуры. Температура посева многолетних трав имеет более низкие значения по сравнению со значениями температуры посевов ячменя, овса и парового поля (исключение 27 мая). Проведение сенокосения в конце июня привело к снижению объема фитомассы, и вследствие этого к уменьшению значения NDVI и увеличению радиационной температуры.

Анализ измерений радиационной температуры поверхности исследуемых участков 27 мая 2020 г. показал, что выпавшие накануне осадки (25 мая – 3 мм, 26 мая – 4 мм осадков) увлажнили почву. В связи с этим увеличились затраты тепла на испарение с поверхности почвы и ее температура уменьшилась. Наличие растительности на поверхности почвы в посеве ячменя и многолетних трав служит сдерживающим фактором уменьшения температуры деятельного слоя. Температура поверхности пара на 2.8 и 2.6 °C ниже, чем на поверхности многолетних трав и ячменя. Поверхность посева овса имеет наиболее низкие значения температуры – 3 °C. В данный момент всходы на поле присутствуют единично, доминирующий фактор в формировании температуры – присутствие большого количества стерни.

На стадии повышения температуры (с 27 мая по 1 июля) радиационная температура посевов ячменя и многолетних трав растет медленнее, чем на поверхностях с овсом и на парах. Это говорит о том, что данные посевы являются экранирующими поверхностями. То есть в это время они способствуют сохранению влаги в почве, что считают положительным фактором. Таким образом, появляется возможность по динамике температур судить о сохранности влаги в почве на различных типах растительности и при накоплении статистически значимых данных приходить к ее количественной оценке.

Следует также учитывать различную функциональную нагрузку дневных и ночных измерений радиационной температуры. Дневные измерения могут позволить получение пространственных данных, по которым можно будет оценить состояние растительности и динамику влажности на посевных площадях. Здесь важным методическим приемом может быть дифференцирование различных площадей в одинаковое время съемки. Применение такого подхода абсолютно реально при использовании беспилотных воздушных судов, так как измерения на различных участках проводятся практически синхронно.



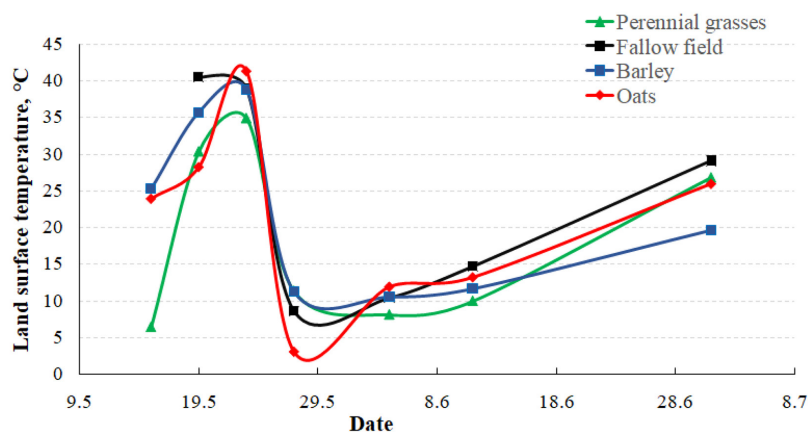


Рис. 3. Средние значения радиационной температуры на исследуемых тестовых участках по данным ZENMUSE XT2

Fig. 3. Average values of land surface temperature in the studied test sites based on ZENMUSE XT2 data

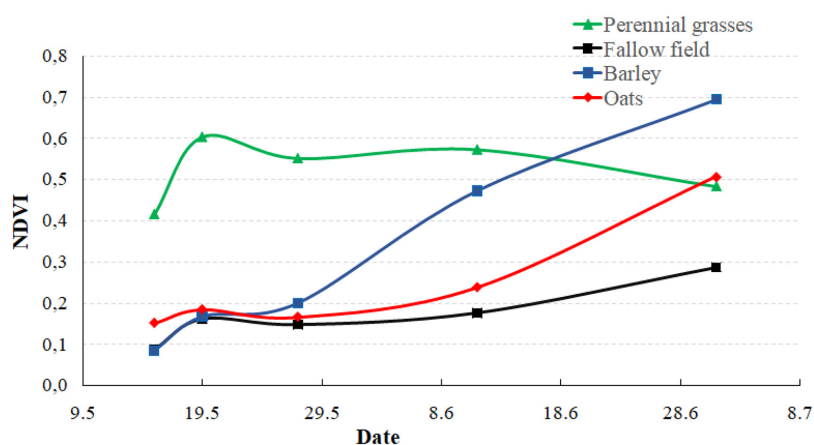


Рис. 4. Средние значения NDVI на исследуемых тестовых участках по данным PlanetScope

Fig. 4. Average NDVI values in the studied test sites based on PlanetScope data

Ночные измерения на посевных площадях планируется провести в ближайшем будущем. Они могут позволить регистрацию базового распределения влажности, связанной с весенним накоплением влаги, высотных микронеоднородностей и динамикой осадков.

На рис. 5 представлены пространственные распределения радиационной температуры на исследуемых тестовых участках с 15 мая по 11 июня 2020 г., позволяющие оценить внутрипольную неоднородность температуры. Такая информация может быть эффективно использована при применении технологий точного земледелия.

### Выводы

Для оценки пространственного и временного распределения радиационной температуры сельскохозяйственных угодий проведено измерение температуры с помощью камеры

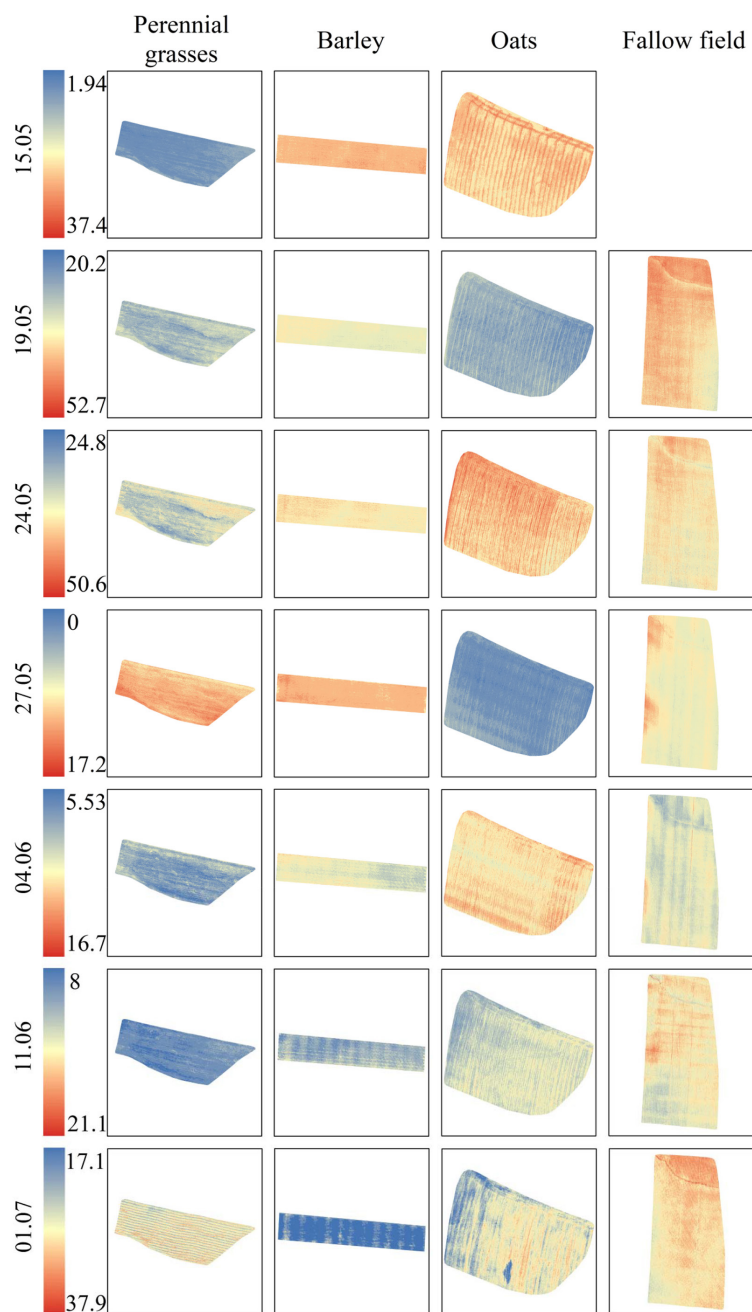


Рис. 5. Пространственное распределение радиационной температуры тестовых участков, съемка выполнена камерой ZENMUSE XT2. Даты съемок 15, 19, 23, 27 мая, 4 и 11 июня, 1 июля 2020 г., пространственное разрешение 12-14 см

Fig. 5. Spatial distribution of the test sites temperature based on ZENMUSE XT2 data. Campaign dates 15.05, 19.05, 23.05, 27.05, 4.06, 11.06, 01.07.2020 (spatial resolution – 12-14 cm)

ZENMUSE XT2, установленной на BBC DJI Matrice 210 RTK V2. Оценка состояния растительности посевов выполнена по спутниковым данным PlanetScope (NDVI) с пространственным разрешением 3 м.



Проведенные исследования показали следующее:

- использование съемок БВС позволяет получать данные высокого пространственного разрешения 12-14 см. Данное разрешение дает возможность оценивать внутрипольную неоднородность температуры исследуемых объектов;
- установлено, что присутствие растений и величина их проективного покрытия являются определяющими в формировании температурных условий почвенного покрова. Рост и развитие растительного покрова, его высоты и сомкнутости изменяют условия температурного режима. Деятельной поверхностью становится не почва, а растительный покров;
- применение дифференцированного подхода к измерению температуры в дневное время может стать маркером состояния и типа посевов;
- ночные измерения могут позволить регистрацию базового распределения влажности, связанной с весенним накоплением влаги, высотных микронеоднородностей и динамикой осадков;
- измерение динамики температур может использоваться для оценки влияния растительности различного типа на сохранение влаги в почве.

### Список литературы / References

- [1] Sami Khanal, John Fulton, Scott Shearer. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 139, 22-32.
- [2] Sepulcre-Canto' G., Zarco-Tejada P.J., Jimenez-Munoz J.C., Sobrino J.A., de Miguel E., Villalobos F.J. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural and Forest meteorology*, 2006, 136(1-2), 31-44.
- [3] Meron M., Tsipris J., Orlov V., Alchanatis V., Cohen Ya. Crop water stress mapping for site-specific irrigation by thermal imagery and artificial reference surfaces. *Precision agriculture*, 2010, 11(2), 148-142.
- [4] Hamlyn Jones, Ilkka Leinonen. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(401), 1423-1431.
- [5] Roselyne Ishimwe, K. Abutaleb, F. Ahmed. Applications of Thermal Imaging in Agriculture – A Review. *Advances in Remote Sensing*, 2014, 3(3), 128-140.
- [6] Anupma Prakash. Thermal remote sensing: concepts, issues and applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33, 239-243.
- [7] Martha C. Anderson, Richard G. Allen, Anthony Morse, William P. Kustas. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122, 50-65.
- [8] Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 1969, 50, 663-666.
- [9] Кронбер П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии, М.: Мир, 1988. 343 с. [Kronber P. *Remote sensing of the Earth: Basics and methods of remote sensing in geology*, Moscow, Mir, 1988, 343 p. (in Russian)].
- [10] Венцкевич Г.З. Сельскохозяйственная метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1952. 324 с. [Ventskevich G.Z. *Agricultural meteorology*, Leningrad, 1952, 324 p. (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0265

УДК 621.37

## Performance Indicators of Vehicle Use in the Transportation Process

**Khalikhul Sh. Choriev\***

*Tashkent Institute of Design, Construction and  
Maintenance of Automotive Roads  
Tashkent, Uzbekistan*

Received 02.05.2020, received in revised form 10.08.2020, accepted 14.09.2020

*Abstract.* The article deals with the connection with the complexity of the design of the car, the diversity of some of its properties and design features, as well as their various combinations and dependences on the operating conditions and type of transportation, because it is difficult to evaluate the car by means of one general indicator. Therefore, in this article, the recommended car quality has been determined by the complex of its most indicative operational properties: capacity using mass, speed, passing ability, safety, etc.

*Keywords:* Efficiency, operation, car, indicator, technical and operational properties, safety.

Citation: Choriev Kh.Sh. Performance indicators of vehicle use in the transportation process, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 766-771. DOI: 10.17516/1999-494X-0265

## Показатели эффективности использования автомобиля в процессе транспортировки

**Х.Ш. Чориев**

*Ташкентский институт по проектированию,  
строительству и эксплуатации автомобильных дорог  
Узбекистан, Ташкент*

*Аннотация.* В связи со сложностью конструкции автомобиля, разнообразием рассмотрены некоторые его свойства и особенности, а также различные их сочетания, зависящие от условий эксплуатации и вида перевозок. Оценить автомобиль одним обобщающим показателем

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: transportlogistikasi@mail.ru

довольно трудно. Поэтому рекомендовано определять качество автомобиля комплексом наиболее показательных его эксплуатационных свойств: емкостью массы, скоростью движения, проходимостью, безопасностью и др.

**Ключевые слова:** эффективность, эксплуатация, автомобиль, свойства, технико-эксплуатационный, безопасность.

Цитирование: Чориев, Х.Ш. Показатели эффективности использования автомобиля в процессе транспортировки / Х.Ш. Чориев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 766-771. DOI: 10.17516/1999-494X-0265

The efficiency of using cars is determined by technical and operational indicators. When analyzing the efficiency of the transportation process, the main indicator is the performance of the rolling stock. Productivity is formed based on several technical and operational indicators that characterize different aspects of road transport. Each of these indicators is influenced by various factors (organizational, economic, technical, etc.), which can affect the indicators themselves, and therefore the performance of cars (Fig. 1).

The efficiency of using a car depends on its quality. Quality is a set of properties that determine the degree of suitability of the car to perform specified functions when used for its intended purpose. The degree of suitability of the vehicle during operation varies.

Due to the complexity of the car's design, the variety of some of its properties and structural features, as well as various combinations of them, different dependencies on the operating conditions and type of transportation, it is quite difficult to evaluate the car by means of one generalizing indicator. Therefore, the quality of the car is determined by the complex of its most significant operational properties: capacity, mass, speed, passing ability, safety, etc.

The efficiency of using cars is described by a system of indicators that can be divided into private and generalizing ones.

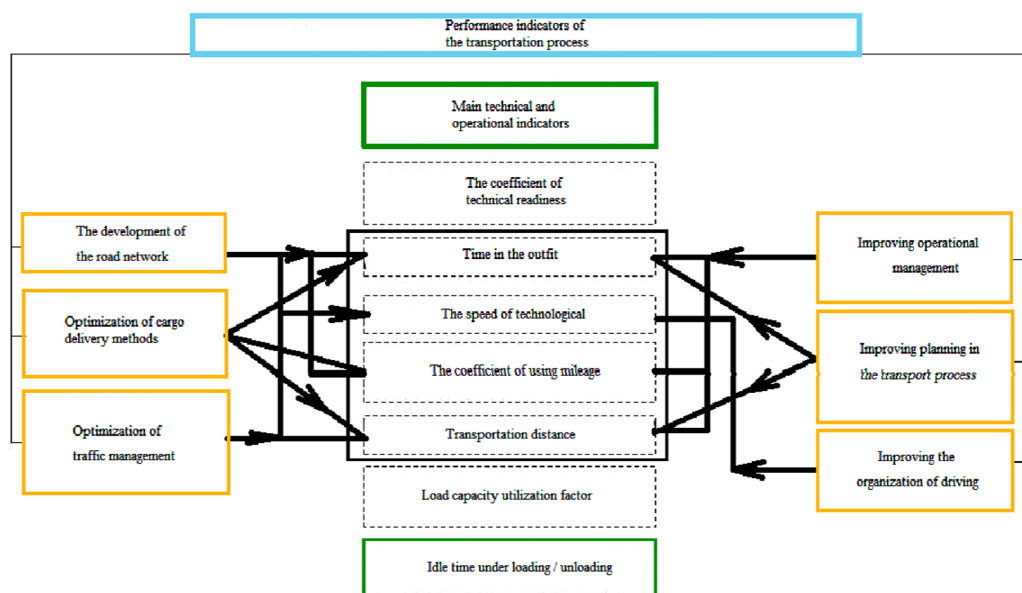


Fig. 1. Factors affecting the performance of the transportation process

Private ones are technical and operational indicators, which include [1]:

- o average number of vehicles;
- o composition of vehicles by type, make and number of days of operation of the rolling stock;
- o time in the outfit;
- o working mileage of the vehicle;
- o driving time of vehicles on the route;
- o technical readiness coefficient;
- o vehicle fleet utilization rates, working hours, and mileage.

Generalizing indicators characterize the influence of many factors in the aggregate on the efficiency of car use. The system of these indicators includes:

- ✓ technical and operational indicators (traffic volume, passenger turnover, vehicle fleet performance);
- ✓ efficiency (cost of transportation, profit and profitability).

Vehicle efficiency refers to the level of performance and the degree of use of vehicles. Car performance indicators include:

- o daily and annual output per 1 vehicle;
- o number of days worked;
- o time when vehicles are in gear and in motion;
- o park utilization rate in dress and movement;
- o fleet utilization rate on the line;
- o the utilization factors of the mileage.

These indicators are applicable for evaluating current and annual vehicle usage estimation.

The main technical and operational indicators of vehicle operation are: technical readiness of the rolling stock, production on the line, use of the rolling stock and the duration of its operation, etc.

Analysis of the performance of freight and passenger transport shows that the greatest impact on performance is the time in the outfit and the average speed of the car.

The factors affecting the performance of the car

For freight transport:

$$Q = \frac{q\gamma T_H \beta V_T}{l_{eg} + \beta V_T t_{pr}}, \quad (1)$$

$$T_H = t_{dv} + t_{pr}, \quad (2)$$

$$V = \frac{L}{t_{dv}}. \quad (3)$$

For passenger transport:

$$P_p = T_H V_e \beta g_v \gamma_v A_{sp} \alpha_v \Delta_{\kappa}, \quad (4)$$

$$T_H = T_m + T_o, \quad (5)$$

$$V_e = \frac{L_{sut}}{T_H}. \quad (6)$$

The time the car is in the vehicle's attire ( $T_n$ ) is determined by the number of hours from the moment the car leaves the motor transport company until it returns to the Parking lot, except for the time of rest and lunch for the driver.

$$T_n = T_{dv} + t_{np} = T_m + t_0, \quad (7)$$

where  $T_{dv}$  is the driving time of the car;  $T_{pr}$  – idle time of the vehicle under loading/unloading;  $T_m$  – vehicle operating time on the route;  $T$  – time zero of the run.

Vehicle speeds are divided into technical, operational, and message speeds.

Technical vehicle speed ( $V_T$ ) includes all short temporary stops associated with traffic:

$$V_T = \frac{L}{T_{dv}}, \quad (8)$$

where  $L$  is the distance traveled.

The operating speed of a vehicle ( $V_e$ ) is the conditional speed of the vehicle during its stay on the line:

$$V_T = \frac{L}{T_m} = \frac{L}{T_{dv} + t_{pr} + T_{pt}}, \quad (9)$$

where  $T_{PT}$  is the downtime of the vehicle for technical reasons.

According to these formulas for  $Q$  and  $P$ , you can increase the efficiency of the vehicle use by increasing the mileage and load capacity utilization factors, increasing the load capacity, and increasing the average daily mileage of the vehicle, which depends on the technical speed of the vehicle and the downtime during loading and unloading.

As a result of the analysis of technical and operational indicators of the transportation process, those indicators that mainly depend on the parameters of the road, traffic flow and affect the performance of the car.

The efficiency of the transportation process depends on the speed of delivery. The cost of cargo transportation and the amount of inertia in the transportation process are affected by changes in the technical speed of the vehicle. The inertia of the transportation process is a mismatch between the transportation capacity of the transportation complex and the existing amount of cargo flow. The costs that appear in connection with the identification of the inertia of the transport process can be determined [2]:

$$R = \left[ 1 - \frac{1 + \frac{l_{eg}}{t_{pr} V_T \beta_e}}{1 + \frac{l_{eg}}{t_{pr} V_T \beta_e}} \right]. \quad (10)$$

Due to the increased costs of the transportation process, it is necessary to consider the impact of indicators of the road network on the speed of cargo transportation.

The main indicators that assess the traffic congestion of the road network are the speed, density and intensity of traffic flow. The relationship between the density and speed of traffic flow is expressed in the Greenshields model [3]:

$$V = V_o \left(1 - \frac{k}{k_c}\right), \quad (11)$$

where  $V$  – is the maximum possible speed on the road;  $V_o$  – speed of free movement of cars in the stream;  $k$  – flux density;  $k_c$  – maximum flow density that causes all cars in the stream to stop completely.

In mathematical form, the relationship between the intensity and speed of traffic flow is represented by the following models [3]:

$$N = k_c V \left(1 - \frac{V}{V_o}\right), \quad (12)$$

where  $N$  – the intensity of the traffic.

$$N = V_o k \left(1 - \frac{k}{k_c}\right). \quad (13)$$

In this mathematical model, the traffic load of the road network is shown as  $k/k_c$ . These models allow you to estimate the intensity and speed of traffic flow in any city, both on main roads and on roads with low traffic intensity.

The efficiency of the transport process includes the performance of the transport process and traffic safety. A comprehensive indicator for evaluating the efficiency of the transport process should be measurable in real conditions of traffic flow and have a cost expression.

The transport process management system uses a whole set of different indicators that can be of crucial and secondary importance:

- capacity of the road network;
- parameters of the road network;
- the intensity of the traffic flow;
- transport delays;
- your average speed;
- travel time;
- number of vehicle stops;
- the length of the queues in front of intersections;
- the number and severity of road accidents (accidents); the degree of pollution of the environment;
- the level of noise generated by vehicles (vehicles).

The above indicators are related, but the type of dependencies among most of them is not defined. Some of the indicators are determined by collecting and analyzing statistical data [1, 4].

The calculation of certain indicators is made based on the purpose of the assessment. Many of the indicators are determined in the aggregate. When calculating economic efficiency, many indicators are taken into account in monetary terms. When setting the optimization problem, it is usually sufficient to determine a small number of indicators, since it is known that minimizing one parameter that affects the efficiency of the transportation process affects others. For example, when traffic delays are reduced, the speed of traffic flow increases, and traffic time, gas pollution, and noise are reduced accordingly.

When analyzing the car's performance indicators, you must select the leading one. The effectiveness of the transport system is most clearly shown by the work of intersections on the road network. The

throughput of intersections can be crucial in determining the performance of the transport system as a whole.

The main indicators that need to be determined when analyzing the performance of intersections are the average delay time of vehicles and the average service time of the intersection. When determining transport delays, you can use one of the many known techniques. You can also calculate the vehicle delay time in monetary terms.

There is an indirect relationship between the value of the average transport delay and the degree of traffic safety, since reducing the number and duration of vehicle delays on the route leads to a decrease in the psychological fatigue of drivers, which leads to a decrease in the probability of road accidents.

### References

- [1] Gorev A.E. Cargo road transport. Moscow: "Academy", 2008. 288 p.
- [2] Velmozhin A.V., Gudkov V.A., Mirotin L.B., Kulikov A.V. Freight transport by road. Textbook. M: Hot Line-The Telecom, 2006. 560 p.
- [3] The iNOS. H. traffic Management. Moscow: Transport, 1983. 248 p.
- [4] Klinkowski G.I. Organization of road traffic. Moscow: Transport, 2001. 247 p.
- [5] <http://google.uz/>
- [6] <https://mail.yandex.ru/?win=267&clid=2100778-003>