

ISSN 2658-3801 (PRINT)
ISSN 2713-0444 (ONLINE)

ОППОНЕНТ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛОВ

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОППОНЕНТ

WWW.PROFFOPPONENT.RU — 1.2022 —

НИКОЛАЙ ДМИТРИЕВИЧ РОГАЛЕВ
ЕСТЬ ЦЕЛЬ — ЕСТЬ СЛАВА



ЦИФРОВАЯ СТРАТЕГИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ПЕРЕХОДА

УПРАВЛЕНИЕ
СУШИЛЬНЫМ
БАРАБАНОМ

ГИДРОСТРУЙНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ В ГОРНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ

РАДИАЦИОННАЯ
ОПАСНОСТЬ

ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА
В АРКТИКЕ

ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ
КОНДЕНСАТОРОВ

Организаторы



ПРАВИТЕЛЬСТВО
РЕСПУБЛИКИ
БАШКОРТОСТАН



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
ЭНЕРГЕТИКИ И ИННОВАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



БАШКИРСКАЯ
ВЫСТАВОЧНАЯ
КОМПАНИЯ

Официальная поддержка



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



МИНИСТЕРСТВО
ЭНЕРГЕТИКИ РФ

12-14 октября ВДНХ ~~ЭКСПО~~ Уфа 2022



Российский
энергетический форум

Энергетика Урала

XXVIII специализированная выставка

12+



■ По вопросам выставки

Бронь стенда www.energobvk.ru
+7 (347) 246-41-93 energo@bvkexpo.ru

■ По вопросам форума

Регистрация на форум www.refbvk.ru
+7 (347) 246-42-81 kongress@bvkexpo.ru



Научно-практическое образование
для профессионалов

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОППОНЕНТ

№1 2022

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- Альтенбах Х.**, д.т.н., профессор (Магдебург, Германия)
Васильев А.Н., д.т.н., профессор (Москва)
Васильев Ю.С., д.т.н., профессор, академик РАН (Санкт-Петербург)
Вейдоу Н., д.т.н., профессор, академик КАН (Пекин, Китай)
Елистратов В.В., д.т.н., профессор (Санкт-Петербург)
Коротеев А.А., д.т.н., профессор, академик РАН (Москва)
Крёнинг М., д.т.н., профессор (Саарбрюккен, Германия)
Окрепилов В.В., д.т.н., профессор, академик РАН (Санкт-Петербург)
Рогалев Н.Д., д.т.н., профессор (Москва)
Рудской А.И., д.т.н., профессор, академик РАН (Санкт-Петербург)
Сергеев В.В., д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН (Санкт Петербург)
Стребков Д.С., д.т.н., профессор, академик РАН (Москва)
Тендлер М.Б., профессор, иностранный член РАН (Стокгольм, Швеция)
Турабджанов С. М., д.т.н., профессор (Ташкент, Узбекистан)
Федоров М.П., д.т.н., профессор, академик РАН (Санкт-Петербург)
Шаумбург Х., д.т.н., профессор (Гамбург, Германия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Амерханов Р.А.**, д.т.н., профессор (Краснодар)
Гортышов Ю.Ф., д.т.н., профессор, академик АН РТ (Казань)
Грибин В.Г., д.т.н., профессор (Москва)
Григораш О.В., д.т.н., профессор (Краснодар)
Грузков С.А., к.т.н., профессор (Москва)
Деревяшкин И.В., д.т.н., профессор (Москва)
Кирпичникова И.М., д.т.н., профессор (Челябинск)
Кузнецов С.Е., д.т.н., профессор (Санкт-Петербург)
Лунин В.П., д.т.н., профессор (Москва)
Павленко А.В., д.т.н., профессор (Новочеркасск)
Погребисский М.Я., к.т.н., доцент (Москва)
Сафонов Ю.М., к.т.н., профессор (Москва)
Серебрянников С.В., д.т.н., профессор (Москва)
Смирнов С.Е., д.т.н., профессор (Москва)
Таранов М.А., д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН (Зерноград)
Трубилин Е.И., д.т.н., профессор (Краснодар)
Туричин Г.А., д.т.н., профессор (Санкт-Петербург)
Тягунов М.Г., д.т.н., профессор (Москва)
Харченко В.В., д.т.н., профессор (Москва)
Шевырев Ю.В., д.т.н., профессор (Москва)
Щербаков А.В., д.т.н., профессор (Москва)

Учредитель и издатель
ООО «Оппонент»



Редакция журнала
«Технический оппонент»

Главный редактор
Н.Д. Рогалев, д.т.н., профессор

Технический редактор
А.А. Краснова

Редактор-корректор
М.В. Соколова

Дизайн и верстка
С.М. Ветров

Учредитель и издатель
ООО «Оппонент»

Генеральный директор
В.С. Романов

Главный редактор издательства
С.В. Камзолова



Адрес редакции

109028, Москва,
ул. Земляной Вал, 50а, стр. 4.
Тел./факс: +7(495) 663-39-00.
Сайт: <http://www.proffopponent.ru>.
E-mail: proffopponent@mail.ru.

Подписка

E-mail: resopponent@mail.ru,
+7 (495) 663-39-00.

Журнал «Технический оппонент»

Научно-практическое образование для профессионалов, выходит 4 раза в год, освещает весь спектр актуальных проблем в сфере техники и современных технологий, а также тенденций в развитии технических наук. Журнал является профессиональным изданием для инженеров.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-72415 от 28.02.2018.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

ISSN: 2658-3801. ISSN online: 2713-0444.

Журнал является научным изданием для инженеров, поэтому на него не распространяются требования Федерального закона от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию».

При перепечатке материалов ссылка на журнал «Технический оппонент» обязательна.

Полное или частичное воспроизведение материалов, опубликованных в журнале, допускается только с письменного разрешения ООО «Оппонент».

Ответственность за содержание рекламных материалов несут рекламодатели.

Ответственность за достоверность приведенных сведений, наличие данных, не подлежащих открытой публикации, и точность информации по цитируемой литературе несут авторы.

Позиция редакции может не совпадать с мнением автора. Материалы, переданные в редакцию, не возвращаются.

Требования к оформлению статей размещены на сайте www.proffopponent.ru. Журнал включен с 2018 года в Российский индекс научного цитирования.

Все права защищены. 2022 г.

Дата выхода журнала — март — апрель 2022 г.
Тираж — 35 000 экз.

© ООО «Оппонент», 2022



Chief Editor

N.D. Rogalev, DScTech, Professor

Technical Editor

A.A. Krasnova

Editor-Proofreader

M.V. Sokolova

Design and Layout

S.M. Vetrov

Publishing House

000 «Opponent»

CEO

V.S. Romanov

**Editor-in-Chief
of the Publishing House**

S.V. Kamzolova



Editorial Office

109028, Zemlianoi Val st., 50a, b. 4, Moscow.

Tel./fax: +7 (495) 663-39-00.

Website: <http://www.proffopponent.ru>.

E-mail: proffopponent@mail.ru.

Subscribe

E-mail: recoffopponent@mail.ru,

+7 (495) 663-39-00.

The Magazine «Technical opponent» — is a scientific and practical education for professionals issuing 4 times a year. It covers a variety of current issues in the field of engineering and modern technologies, as well as up trends in technical sciences. The magazine is a professional publication for engineers.

The magazine is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information, Technology and Mass Media (Roskomnadzor).

This journal is included in Russian Science Citation Index (RSCI).

ISSN print: 2658-3801.

ISSN online: 2713-0444.

Series PI No. FS77-72415, February 28, 2018.

The journal is a scientific publication for engineers, so it is not subject to the requirements Federal Law № 436-F3 of 29.12.2010 «On the protection of children from information that harms their health and development».

The point of view of the authors may not coincide with the opinion of the editorial board. No part of this issue may be reproduced without written permission of the 000 «Opponent».

At a reprint of materials the link on journal «Technical Opponent» is mandatory.

Advertisers are responsible for the content of advertisements.

Authors are responsible for reliable information, for the availability of data are not subject to open publication, and accuracy of information on the cited literature. The editorial standpoint may not correspond with authors' opinions. All incoming manuscripts are subject to review.

Editors do not correspond with authors, whose articles are considered unsuitable for the publication. Materials sent to the editor will not be returned.

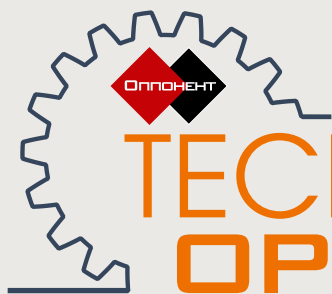
In the Russian Science Citation Index since 2018.

All rights reserved. 2022.

Date of Issue — March — April 2022.

Printing — 35 000 copies.

© 000 «Opponent», 2022



Scientific and Practical Education
for Professionals

TECHNICAL OPPONENT

№ 1 2022

EDITORIAL BOARD

- Altenbach H.**, DScTech, professor (Magdeburg, Germany)
Vasiliev A.N., DScTech, professor (Moscow)
Vasiliev Yu.S., DScTech, professor, Acad. RAS (St. Petersburg)
Elistratov V.V., DScTech, professor (St. Petersburg)
Koroteev A.A., DScTech, professor, Acad. RAS (Moscow)
Krönig M., DScTech, professor (Saarbrücken, Germany)
Okrepilov V.V., DScTech, professor, Acad. RAS (St. Petersburg)
Rogalev N.D., DScTech, professor (Moscow)
Rudskoy A.I., DScTech, professor, Acad. RAS (St. Petersburg)
Sergeev V.V. DScTech, professor, corr. member RAS (St. Petersburg)
Strebkov D.S., DScTech, professor, Acad. RAS (Moscow)
Tendler M.B., DScTech, professor, for. member RAS (Stockholm, Sweden)
Turabdzhanov S.M., DScTech, professor (Tashkent, Uzbekistan)
Fedorov M.P., DScTech, professor, Acad. RAS (St. Petersburg)
Schaumburg H., DScTech, professor (Hamburg, Germany)
Weidou N., DScTech, professor, Acad. CAE (Pekin, China)

EDITORIAL COUNCIL

- Amerkhanov R.A.**, DScTech, professor (Krasnodar)
Gortyshov Yu.F., DScTech, professor, Acad. AS RT (Kazan)
Gribin V.G., DScTech, professor (Moscow)
Grigorash O.V., DScTech, professor (Krasnodar)
Gruzkov S.A., DscTech, professor (Moscow)
Derevyashkin I.V., DScTech, professor (Moscow)
Kirpichnikova I.M., DScTech, professor (Chelyabinsk)
Kuznetsov S.E., DScTech, professor (St. Petersburg)
Lunin V.P., DScTech, professor (Moscow)
Pavlenko A.V., DScTech, professor (Novocherkassk)
Pogrebissky M.Ya., DscTech, professor (Moscow)
Safonov Yu.M., DscTech, professor (Moscow)
Serebryannikov S.V., DScTech, professor (Moscow)
Smirnov S.E., DScTech, professor (Moscow)
Taranov M.A., DScTech, professor, corr. member RAS (Zernograd)
Trubilin E.I., DScTech, professor (Krasnodar)
Turichin G.A., DScTech, professor (St. Petersburg)
Tyagunov M.G., DScTech, professor (Moscow)
Kharchenko V.V., DScTech, professor (Moscow)
Shevyrev Yu.V., DScTech, professor (Moscow)
Shcherbakov A.V., DScTech, professor (Moscow)

СОДЕРЖАНИЕ

5



ОТ РЕДАКЦИИ

Слово главного редактора номера

Н.Д. Рогалев, С.В. Камзолова

6–11



ГЛАВНЫЙ ОППОНЕНТ

Есть цель — есть слава

Н.Д. Рогалев, С.В. Камзолова

12–18



ПЕРСПЕКТИВА

Цифровая стратегия энергетического перехода

М.Г. Тягунов

19–23

Электрические и тепловые характеристики аргоновой дуги в зоне стабилизации ламинарного плазмотрона

А.М. Кручинин, М.Я. Погребисский, Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин

24–27

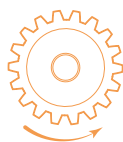


СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Применение гидроструйных технологий в горном производстве

В.Г. Мерзляков, И.В. Деревяшкин

28–33



ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЫБОР

Радиационная опасность и чрезвычайные ситуации на объектах атомной промышленности России

В.В. Спиридонова, В.П. Спиридонов

34–40

Техническое решение адаптивной системы управления сушильным барабаном на обогатительной фабрике «Лебединский ГОК»

И.В. Деревяшкин, М.Е. Тараненко, А.А. Казанцев

41–50



АКТУАЛЬНЫЙ ВОПРОС

Концептуальный анализ мощности морских ветроэнергетических установок при работе в арктических условиях

А.Е. Харсеев, А.С. Большев, С.А. Фролов, В.В. Елистратов, А.А. Панфилов

51–56



ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Самовосстанавливающиеся полимеры для силовых пленочных конденсаторов

Ю.В. Зайцев, Д.М. Михайлов, Ю.М. Кривогуз, Д.Н. Петриев, А.Ю. Мирошниченко, Е.М. Торина

57–64

Методы управления сложными объектами: история

А.В. Спиридонов, И.В. Деревяшкин, В.П. Спиридонов

CONTENTS

-
- 5**  **EDITORIAL**
Introductory remarks
N.D. Rogalev, S.V. Kamzolova
-
- 6–11**  **MAIN OPPONENT**
There is a goal — there will be glory
N.D. Rogalev, S.V. Kamzolova
-
- 12–18**  **PERSPECTIVE**
Digital energy transition strategy
M.G. Tyagunov
- 19–23** **Electrical and thermal characteristics of the argon arc in the stabilization zone of the laminar plasmatron**
A.M. Kruchinin, M.Ya. Pogrebisskiy, E.S. Ryazanova, A.Yu. Chursin
-
- 24–27**  **MODERN PRODUCTION**
The use of water jet technology in mining
V.G. Merzlyakov, I.V. Derevyashkin
-
- 28–33**  **TECHNICAL CHOICE**
Radiation hazards and emergencies at nuclear power facilities in Russia
V.V. Spiridonova, V.P. Spiridonov
- 34–40** **Technical solution of adaptive control system for drying drum in ore-processing plant JSC Lebedinsky GOK**
I.V. Derevyashkin, M.E. Taranenko, A.A. Kazantsev
-
- 41–50**  **HIGHLIGHT**
Conceptual analysis of the capacity of offshore wind power plants when operating in arctic conditions
A.E. Kharseev, A.S. Bolshev, S.A. Frolov, V.V. Elistratov, A.A. Panfilov
-
- 51–56**  **TECHNIC AND TECHNOLOGY**
Self-healing polymers for film power capacitors
Yu.V. Zaitsev, D.M. Mikhailov, Yu.M. Krivoguz, D.N. Petriev,
A.Yu. Miroshnichenko, E.M. Torina
- 57–64** **Methods of complex objects management: history**
A.V. Spiridonov, I.V. Derevyashkin, V.P. Spiridonov



Уважаемые коллеги!

Сегодня как никогда важно и для всей технической индустрии, и для страны, и для российского народа сплотиться во имя развития нашей национальной науки и промышленности.

Журнал «Технический оппонент», оппонируя всему ложному и неправильному, на страницах номера публикует для читателей самые актуальные материалы: начиная от цифровой стратегии энергетического перехода, новых технологий в атомной, горнорудной, машиностроительной отраслях и заканчивая разработками альтернативной энергетики в Арктике и управлением сложными объектами.

Выпуск посвящен юбилею профессора Николая Дмитриевича Рогалева, главного редактора журнала «Технический оппонент», ректора МЭИ, который уверенно ведет свой вуз на первые позиции, создает новые институты, кафедры и совместные межотраслевые успешные проекты.

С такими учеными и руководителями страна сможет преодолевать любые проблемы, а россияне будут верить в себя и в наш общий успех!

Мы поздравляем Николая Дмитриевича с юбилеем и желаем от наших читателей и редакционного совета крепкого здоровья, вдохновения и энергии для новых свершений, поддержки и уважения коллег, любви родных, благополучия и процветания!

**Редакция журнала «Технический оппонент»,
главный редактор издательства С.В. Камзолова**

Есть цель — есть слава

Интервью к 60-летию ректора Национального исследовательского университета «МЭИ» Николая Дмитриевича Рогалева, ученого-энергетика, доктора технических наук, профессора.

Родился 17 февраля 1962 года в Татарской АССР. В 1985 году окончил теплоэнергетический факультет МЭИ. Учился в аспирантуре при кафедре котельных установок и экологии энергетики. В 1988 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Определение загазованности атмосферы от энергокомплексов крупных городов с целью регулирования качества воздушной среды». Являлся одним из создателей первого в системе высшей школы технопарка (1991). В 1993 году стажировался в качестве ведущего исследователя в Институте инноваций, креативности и капитала Университета Техаса (г. Остин, США). В 1999 году защитил докторскую диссертацию на тему «Проблемы разработки и коммерциализации в техническом университете». В течение 12 лет (с 2001 года) Н.Д. Рогалев возглавлял кафедру экономики промышленности и организации предприятий НИУ «МЭИ» (ныне — кафедра экономики в энергетике и промышленности). В 2003–2007 гг. был проректором НИУ «МЭИ» по инновационной деятельности. С 2007 по 2010 год работал в ОАО «Газпром»: советником генерального директора ООО «НИИгазэкономика», заместителем генерального директора ООО «Газоэнергетическая компания» по инновационному развитию, заместителем генерального директора ООО «Газпром энергохолдинг» по инновационному развитию. В 2010–2012 гг. — научный руководитель, первый заместитель генерального директора холдинга «Эскотек». С 2012 по 2013 год был заместителем управляющего фонда «Энергия без границ» ПАО «Интер РАО» по научной и инновационной деятельности. С 2013 года по настоящее время — ректор НИУ «МЭИ».

К сфере научных интересов Н.Д. Рогалева относятся научные, технологические и экономические проблемы топливно-энергетического комплекса, технологического трансфера и коммерциализации технологий, а также вопросы образования. Автор и соавтор более 300 научных трудов и патентов.

Ликвидатор последствий Чернобыльской аварии. Директор технологической платформы «Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности». Действительный член Международной академии наук высшей школы и Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы. Заслуженный работник ЕЭС России. Награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, а также в сфере образования.

Беседовала главный редактор журнала «Технический оппонент» С.В. Камзолова

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рогалев Н.Д., Камзолова С.В. Есть цель — есть слава. *Технический оппонент*. 2022; 1 (8): 6–11.

There Is a Goal — There Will Be Glory

An interview for the 60th birthday of Nikolai Dmitrievich Rogalyov, the Rector of National Research University «Moscow Power Engineering Institute», engineering researcher, Doctor of Technical Science, Professor.

Born on February 17, 1962 in the Tatar ASSR, in 1985 he graduated from the Thermal and Nuclear Power Engineering Department of MPEI. Studied at postgraduate course at the Department of Boiler Plants and Ecology of Power Engineering. In 1988 he defended his PhD thesis on «Determination of air pollution from power complexes of large cities in order to regulate the quality of the air environment». He was one of the founders of the first Technopark in the system of higher education (1991). In 1993, he passed through a training period as a Principal Investigator at the Institute for Innovation, Creativity, and Capital at the University of Texas at Austin. In 1999 defended his doctoral dissertation on «Problems of Development and Commercialization in a Technical University». For 12 years (since 2001) N.D. Rogalyov was the head of the Department of Industrial Economics and Enterprise Organization at the National Research University «MPEI» (now — the Department of Economics in Power Engineering and Industry). In 2003–2007 he was the Vice-Rector for innovative activity of MPEI. Between the years 2007 and 2010 he worked at Gazprom: as an Adviser to the Director General of NIlgazekonomika, Deputy Director General of Gazenergeticheskaya Kompaniya for Innovative Development, Deputy Director General of Gazprom Energoholding for Innovative Development. From 2010 to 2012 — Scientific Supervisor, First Deputy General Director of ESKoTek Holding. From 2012 to 2013 — Deputy Managing Director of the Energy Without Borders Foundation of PJSC Inter RAO for Research and Innovation. From 2013 onwards, he has been Rector of the National Research University «MPEI».

Scientific interests of N.D. Rogalyov include scientific, technological and economic problems of the fuel and energy complex, technological transfer and commercialization of technologies, as well as educational issues. He is the author and co-author of more than 300 scientific works and patents.



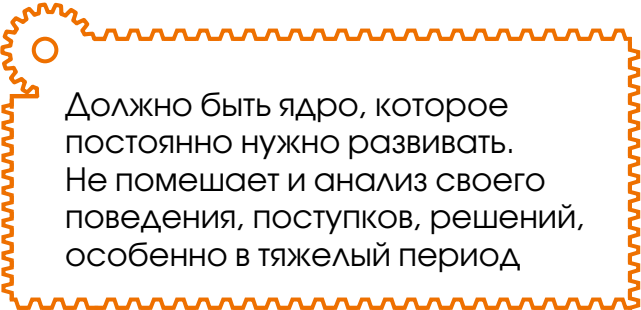
Chernobyl liquidator. Director of the technological platform «Environmentally-friendly and High Efficiency Thermal Energy». Full member of the International Higher Education Academy of Sciences and the International Academy of Ecology, Human and Nature Safety Sciences. Distinguished Employee of UES of Russia. Awarded Medal of the Order «For Merit to the Fatherland» II class, winner of the RF Government Prize in Science and Technology, as well as in Education.

Interviewed by the editor-in-chief of the journal «Technical Opponent» S.V. Kamzolova

FOR CITATION: Rogalyov N.D., Kamzolova S.V. There is a goal — there will be glory. *Technicheskiy opponent* = *Technical Opponent*. 2022; 1 (8): 6–11.

— **Николай Дмитриевич, расскажите немного о себе, о том, кто повлиял на выбор энергетического направления.**

— Я родился в поселке городского типа Уруссу (в переводе — «русская вода») Татарской АССР. В советский период он задумывался как энергетическая столица Татарстана. В поселке открыли Уруссинскую ГРЭС, большую по тем временам, строилась соответствующая инфраструктура. И в моем сознании эта электростанция была важной составляющей. Папа окончил энергетический техникум. Мои сестры поступили в Томский политех на энергетиков, а два двоюродных брата — в Куйбышевский политех. Наша семья переехала в Сургут, когда папу перевели туда по работе. Там я окончил школу с похвальным листом, то есть с серебряной медалью (по современным меркам). У меня была одна четверка. Из Сургута я поехал поступать в Москву, в МЭИ.



Должно быть ядро, которое постоянно нужно развивать. Не мешает и анализ своего поведения, поступков, решений, особенно в тяжелый период

— **Вы много читали? На Вас повлияла художественная литература?**

— Да, читал и продолжаю читать много. Когда был подростком, любил роман «Как закалялась сталь». Постарше читал произведения Толстого, Чехова и многих других наших классиков, увлекался творчеством Дюма. Считаю чтение художественной литературы частью культуры и образования. Если специалист сконцентрирован только на профессиональных книгах, то он будет, скорее всего, зажат в рамки, в том числе в плане понимания того, что происходит в обществе, в стране, мире. Порой те ситуации, события, которые описаны в художественной литературе, помогают в решении рабочих и повседневных задач.

— **Какие качества должны быть присущи руководителю крупного вуза? Что помогает стать хорошим управленцем в любой отрасли?**

— Надо много заниматься своей профессиональной сферой, отлично разбираться в ней. Следует понимать, как выстраивать свои отношения с коллегами, что представляет собой коллектив, которым ты руководишь, как его возглавлять. Университет с точки зрения управления — крайне сложная организация. Здесь очень высокий образовательный ценз, работники умственного труда, каждый сам себе де-факто и руководитель, и исполнитель в рамках научно-педагогической работы. Я не могу утверждать, что ректор обязан быть самым умным и компетентным, есть специалисты, которые в определенных областях, безусловно, превосходят первое лицо вуза. Но при этом у главного руководителя должен быть очень высокий потенциал, ему надо постоянно учиться и совершенствоваться.

— **Что Вы можете посоветовать молодым специалистам, которые хотят достичь в профессии больших высот?**

— Это зависит от характера, от генотипа. Должно быть ядро, которое постоянно нужно развивать. Не мешает и анализ своего поведения, поступков, решений, особенно в тяжелый период. Каждому человеку, даже сильному, присущи нотки отчаяния в определенное моменты, и это тоже надо преодолевать. Как говорят, нет цели — нет славы. Во многом от того, какие задачи ставит человек и как их решает, зависит его успех. В любой деятельности есть талантливые или даже гениальные специалисты, но дорасти до их уровня большинству людей не под силу. Таких, как физики Нильс Бор, Лев Ландау, — единицы. Но при этом хороших специалистов в этой области много, они ставят серьезные цели и стремятся походить на крупных ученых. Но достичь их высот по каким-то причинам так и не могут.

— **С какими людьми Вам работается комфортно?**

— С трудолюбивыми и самостоятельными, которые способны после коллективного обсуждения какой-то задачи действовать и делиться результатами своей работы, которые могут воспринимать критику и участвовать в дискуссии, понимать, что необходимо вносить вклад в общее дело.

— **У Вас успешная команда. Как Вы выстраиваете работу коллектива, как оцениваете сотрудников?**

— С одной стороны, у нас групповая работа, в том числе и выработка решений. С другой, считаю основной составляющей наделение правами и автономией руководителей и их сотрудников. Перед университетом стоит много задач, все они важные, и каждую

должны решать самостоятельно определенные работники, как и нести ответственность за свой участок. У нас есть своя внутренняя система оценки результативности сотрудников — научно-педагогических кадров, административно-управленческого персонала. Это набор показателей деятельности каждого нашего работника. В этом году мы перешли на индивидуальное годовое планирование. Каждому сотруднику, исходя из его возможностей, его сильных сторон, поручены поставленные университетом задачи и запланированные мероприятия, которые нужно реализовать в течение года.

— **И какие задачи у вуза сегодня?**

— Первый блок связан с развитием университета, в том числе с написанием современных учебников по фундаментальным направлениям, с созданием электронных образовательных ресурсов, с формированием инновационной деятельности как системы в вузе. Есть и другая специфика работы, которую определяет наш учредитель — Министерство науки и высшего образования РФ. Это программа «Приоритет-2030», инициированная министром Валерием Николаевичем Фальковым. Она охватывает сегодня более 100 вузов и связана с реализацией определенных стратегических проектов в сфере образования.

— **Сколько кафедр в университете? Каковы критерии их развития?**

— Шестьдесят кафедр, это крупные объединения. Сейчас Университет — саморазвивающееся учреждение. Каждая кафедра — это мини-организация, которая отвечает за образовательную, научную и инновационную деятельность. В каждом структурном подразделении работают в среднем около 30 человек. Критерии их развития — это успешность. У каждой кафедры есть своя программа, где обозначены общие показатели, которые сопрягаются с индивидуальным вкладом каждого научно-педагогического работника.

— **Какие сферы охватывает НИУ?**

— Мы занимаемся всей энергетикой — от ее производства, передачи до конечного использования, а также радиотехникой, космосом, автоматикой и вычислительной техникой. Работаем на промышленность, которой нужны не только ученые, но инженеры, отвечающие за эксплуатацию действующего оборудования. У нас преподают сильные специалисты, в том числе профессора из разных стран. Мы координируем работу по энергетике около 300 вузов и ссузов России. С нами сотрудничают почетные доктора очень высокого класса, а также нобелевские лауреаты в области высокоэффективной, безуглеродной энергетике, например Родней Джон Аллам, Квонг Чунг.

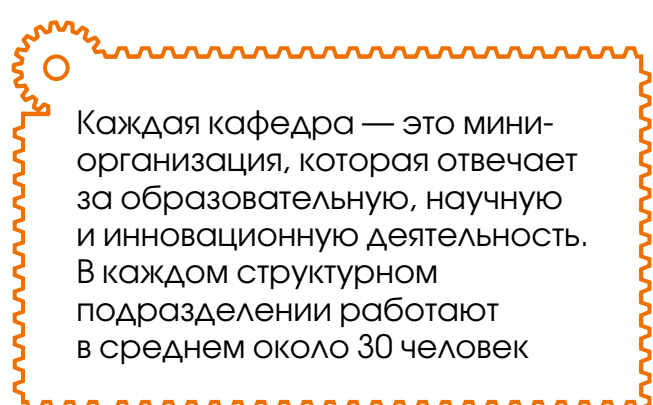
— **У Вас учатся иностранные студенты? Расскажите о самых известных выпускниках вуза.**

— В университете учатся студенты из 68 стран. У нас самое большое количество выпускников. За все время мы подготовили свыше 20 тысяч специалистов, многие из которых занимали ведущие позиции в своих странах. Так, Ли Пэн был премьером Госсовета

Китая, Илиеску — президентом (дважды) Румынии, Борис Евсеевич Черток и Алексей Федорович Богомолов — главными конструкторами у Сергея Павловича Королева. Два министра энергетики Монголии, министр связи и информационных технологий Азербайджана А.М. Аббасов — тоже наши выпускники. В настоящее время должности замминистра, в том числе на Кубе, в Узбекистане и других странах, занимают воспитанники МЭИ.

— **То есть в НИУ развита именно научно-практическая подготовка, есть хорошая инфраструктура?**

— Мы всегда занимались практико-ориентированной подготовкой. После Великой Отечественной войны на территории нашего вуза была построена небольшая тепловая электростанция, где все время учились студенты энергетических специальностей. Она несколько раз модернизировалась, и сейчас тоже проходит этот процесс. Не так давно мы открыли небольшую солнечную электростанцию, а также ветряную. На территории университетского кампуса площадь около 50 гектаров много натуральных объектов, есть учебно-лабораторные корпуса, общежития. За пределами столицы тоже находятся площадки, в том числе и две в Подмосковье. Есть и свой спортивно-оздоровительный лагерь в Крыму, в Алуште. В целом инфраструктура у нас большая.



Каждая кафедра — это мини-организация, которая отвечает за образовательную, научную и инновационную деятельность. В каждом структурном подразделении работают в среднем около 30 человек

— **Какова миссия университета?**

— Это фундаментальное разностороннее образование и передовые технологии для энергетики и инновационной экономики.

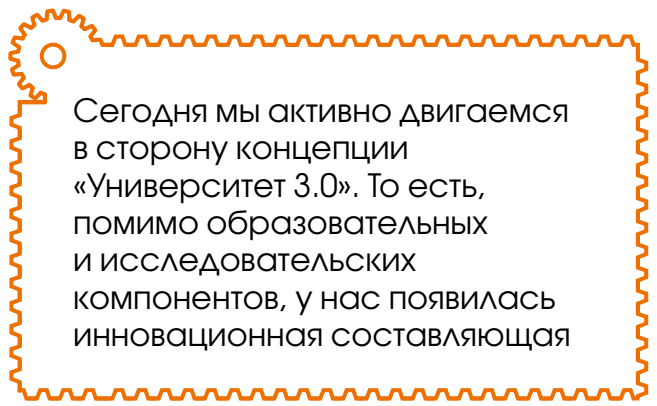
— **Что было сделано за годы Вашего руководства?**

— За девять лет мы серьезно изменили университет и в плане внешнего вида, и с точки зрения содержания, организации работы, многое модернизировали. Создали новый Институт гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, трансформировали Институт энергоэффективности и водородных технологий. Кроме того, провели ребрендинг большинства наших институтов, сохранивших еще с советских времен. Открыли новые — Инженерно-экономический, Гуманитарно-прикладной. Вернулись к вопросам электрификации, т. е. широкого использования электроэнергии в национальной экономике. Это Институт

электротехники и электрификации. МЭИ является одним из трех вузов, у которых есть экспериментальный ядерный реактор. В нашем распоряжении и вся практическая база. Таким образом мы сделали полную реновацию университета. Сейчас это полностью современный и красивый вуз, оснащенный новым оборудованием, который соответствует вызовам времени и способен решить большинство задач, которые стоят перед отраслью энергетики.

— **Вами была проделана огромная работа! А что в ближайших планах?**

— Сейчас мы формируем генеральный план развития университета. Собираемся расстаться с теми направлениями и объектами, которые не играют для нас никакой функциональной роли. Сегодня мы активно движемся в сторону концепции «Университет 3.0». То есть, помимо образовательных и исследовательских компонентов, у нас появилась инновационная составляющая. Даже в индивидуальных показателях для сотрудников есть раздел, связанный с инновациями. Разработаны специальные информационные системы, где каждый может указать ту или иную инновационную работу, которую он выполнил, и получить за это оценку.



Сегодня мы активно движемся в сторону концепции «Университет 3.0». То есть, помимо образовательных и исследовательских компонентов, у нас появилась инновационная составляющая

— **И за такую деятельность предусмотрены поощрения? Насколько вообще финансово целесообразно идти молодым специалистам в научную сферу?**

— Результативность наших сотрудников мы оцениваем в баллах, у которых есть денежный эквивалент, потом трансформирующийся в выплаты в течение года. Если говорить о науке, то заработать можно сколько угодно, лишь бы человек проявил себя. Есть затраты университета на содержание, в том числе научной инфраструктуры, на сопровождение, все остальные деньги находятся в распоряжении руководителя проекта по договорной или госбюджетной работе. От того, сколько он сможет набрать контрактов, от надбавок, от показателей выполнения дорожной карты зависит его денежное вознаграждение в рамках данной программы.

— **Как обстоят дела с интеграцией НЭУ в экономику?**

— С точки зрения взаимодействия с внешними партнерами мы сделали серьезный шаг вперед. У нас в разы улучшилась интегрированность как с наци-

ональной, так и с международной экономикой. Мы удостоены двух наград: от Вьетнама — ордена Труда I степени за подготовку кадров и развитие научных исследований вместе с вьетнамской стороной, от Монголии — ордена Полярной звезды. Нам вручили премию Правительства РФ в области качества и премию СНГ в области качества (ни один вуз России такой награды пока не имеет).

— **Вы ведущий эксперт в области энергетики. Дайте, пожалуйста, оценку состояния этой отрасли в СССР и в России.**

— В советское время топливно-энергетический комплекс нашей страны по эффективности уступал только японскому. Мы опережали США. Есть книга «Технический прогресс энергетики СССР» А.А. Троичко, в которой об этом как раз говорится. Многие события в мировой энергетике последних лет показывали, что российская отрасль получала серьезное развитие, была модернизирована, в том числе и благодаря импортному оборудованию, повысила свою эффективность. Сейчас мы можем обеспечить всем необходимым страну, население, промышленность. Наша энергетика — самая надежная в мире. И это с учетом того, что Россия — самая северная страна, то есть мы живем в тяжелых климатических условиях, в широтах, в которых не находятся другие государства.

— **Какие направления работы наиболее актуальны и требуют больших усилий с Вашей стороны?**

— Сейчас мы нацелены в первую очередь на создание современного и эффективного оборудования и техники для энергетики, в том числе и в области гражданского применения. Отсюда возникает необходимость в подготовке конструкторов, разработчиков, проектировщиков. Мы также реализуем проект «Энергетика больших мощностей нового поколения», в рамках которого разрабатываем целый набор установок и проводим исследования. Есть и программа «Малая распределенная энергетика», хотя ее доля в России и невелика, но она все равно занимает свою нишу. Кроме того, работаем над проектом «Цифровая энергетика». В этом направлении мы очень здорово продвинулись. У нас есть национальный полигон, а также проект Агентства стратегических инициатив. А еще реализуем программу «Климатическая трансформация энергетики» — это все, что связано с углеродным следом, с энергоэффективностью. Сейчас в сферу наших интересов входит и атомная энергетика, в том числе малая. У нас также развита концепция «От микросхемы до системы», связанная с электроникой и ориентированная на промышленные рынки. И конечно, мы занимаемся ИТ-технологиями, кибербезопасностью.

— **В связи со сложившейся политической ситуацией, с санкциями в стране есть все, чтобы обеспечить бесперебойную работу промышленности?**

— Без сомнения. Когда в Советской России начинали реализовывать план ГОЭРЛО, мы даже некоторые виды болтов и гаек не могли производить, а в итоге создали одну из лучших энергетик мира. Сейчас с точки зрения ситуации все гораздо лучше:

есть кадры, заводы, новое оборудование. Конечно, что-то требует модернизации, что-то нужно подтянуть, построить, чего-то мы пока еще не создали. Но есть и хорошие прецеденты, в том числе связанные с отечественными газовыми турбинами, которые по показателям экономичности и экологичности не уступают западным аналогам. Сегодня развеян миф о том, что наша страна навсегда отстала, что никого не догонит. Так, российские достижения в области вооружения показывают, что мы перегоняем многих в этой сфере, просто надо верить в отечественных инженеров и ученых, соответствующим образом помогать деньгами, предпочтениями. Я уверен, что русские обладают самым высоким умственным и генетическим потенциалом в мире. И даже в тяжелое время нам будет по плечу решать самые разные и сложные задачи.

— **Ограничение (а возможно, и прекращение) поставок немного отбросит Россию назад?**

— Думаю, мы будем испытывать какие-то трудности в течение короткого периода, но в конечном счете это нас только усилит. Раньше в нашем представлении очень доминировало то, что в России есть нефть и газ, а остальное купим. Были и серьезные воздействия, направленные на разрушение потенциала страны: и научного, и технического, и образовательного. Но в нынешней ситуации мы должны будем всем этим заниматься, мы не станем терять кадры и обращать внимание на различные факторы, отвлекающие от непосредственной работы.

— **И в это время важно взаимодействие с промышленностью. Как у Вас обстоят дела в этом направлении?**

— Если взять бюджет вуза, то примерно около 40 процентов — это деньги либо за счет дополнительного образования, либо за счет договоров по науке с промышленным сектором. Причем таких контрактов у нас около 60–65 процентов. Более того, в Европе университетов с такими показателями нет. И в этом плане у наших исследовательских вузов большое преимущество: они решают задачи, которые ставит сегодня промышленность, интегрированность в данный сектор у российских университетов высокая. Если появятся дополнительные задачи в отрасли, связанные с пакетом санкций, то мы автоматически возьмемся за их решение, подготовим кадры и все необходимое.

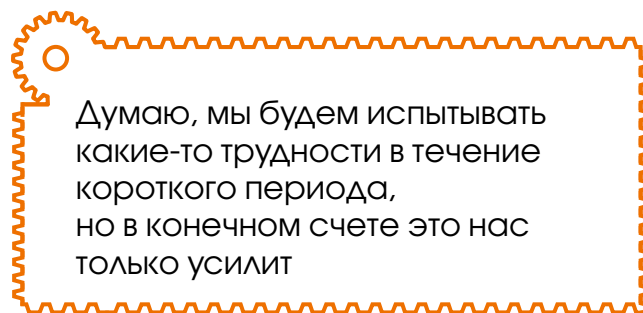
— **Какие ведущие мировые компании сотрудничают с Вашим вузом? Если взаимодействие прекратится, это как-то ударит по Вам?**

— Мы давно сотрудничаем со всеми крупными зарубежными компаниями, которые работают на территории РФ, взаимодействуем с ними по линии учебного процесса, научных исследований, социальных проектов. Это, например, Siemens, ABB, Schneider Electric. У нас всегда были хорошие отношения с немцами, итальянцами, финнами, китайцами. Кстати, самую первую в Москве электростанцию построила компания Siemens, причем в то время, когда был еще жив ее основатель. В краткосрочной перспективе мы, скорее всего, получим какие-то удары. Думаю,

под таким политическим давлением наши западные партнеры и сами не очарованы перспективой разрыва отношений с нами или другими организациями и поставщиками. Надеюсь, что вся эта ситуация будет носить временный характер. Скорее всего, для Европы «отрезвление» пройдет через «холодный душ»: сейчас там напринимают санкций, а потом увидят последствия всех предпринятых мер и будут «откатываться назад» под тем или иным предлогом.

— **А с какими российскими компаниями Вы тесно работаете?**

— Мы, наверное, со всеми компаниями плотно сотрудничаем. Я назову самые крупные: это «РусГидро», «Россети», «Газпром энергохолдинг», «Интер РАО», «Росэнергоатом». То есть те холдинги, которые определяют сегодня главное ядро современной энергетики в России. Если мы говорим об энергомашиностроении, то это компания «Силовые машины», производящая около 70 процентов энергетического оборудования.



Думаю, мы будем испытывать какие-то трудности в течение короткого периода, но в конечном счете это нас только усилит

— **Отечественные заводы, предприятия стали сильнее?**

— Мне кажется, все улучшается. Недавно прошла новость: на нас начали сильно обижаться западные партнеры за то, что мы так стремительно развиваем импортозамещение. Так что в целом ситуация в отрасли становится лучше, появляются спрос и необходимость, а мы доказываем делом. Например, у атомных ледоколов наши двигатели. Кстати, автором атомных энергетических установок для первых таких судов был наш выпускник — Николай Сидорович Хлопкин.

— **Что можете пожелать нашим людям, студентам, инженерам, а также журналу «Технический оппонент»?**

— Я много где побывал, даже стажировался, работал за границей. В моем представлении лучше, чем наша родина, страны нет. Сейчас надо верить в себя и в успех. Но вера должна быть осознанной, что будет все непросто. Надо работать, хоть и появятся проблемы, но обязательно найдутся пути их решения.

Замечательному журналу во главе с очень энергичным и профессиональным главным редактором желаю больших успехов. Надеюсь, что сейчас, с учетом того, что происходит в стране, издание «Технический оппонент» получит хорошее развитие. Уверен в энергии и целеустремленности вашего творческого коллектива. Большое спасибо за совместную работу.



УДК 004.9+620.9
UDC 004.9+620.9

Цифровая стратегия энергетического перехода



Digital Energy Transition Strategy

АВТОР

М.Г. Тягунов, д.т.н, профессор

AUTHOR

M.G. Tyagunov

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

National Research University «MPEI» Moscow, Russia

РЕЗЮМЕ

SUMMARY

В статье рассмотрены вопросы стратегии развития электроэнергетики в условиях цифровизации, понимание которой сильно затруднено неоднозначностью терминов. В медийных, политических и экономических кругах принимаются во внимание только факторы, влияющие на формирование общественного сознания в этом вопросе. А обстоятельства, связанные с законами функционирования энергетической системы как физического объекта, не учитываются. Показано, что пока нет общего подхода, который бы мог послужить основой стратегии развития энергетики. Сформулированы основные принципы построения электроэнергетических систем. При их выполнении развитие энергетики в условиях неуправляемого распространения интернета вещей выглядит предпочтительным. Отмечена необходимость рассмотрения энергетической системы как объединения самобалансирующихся узлов, построенных по иерархическому принципу.

The article deals with the issues of the strategy for the development of the electric power industry in the context of digitalization, the understanding of which is greatly hindered by the ambiguity of concepts. In the media, political and economic circles, only those factors that are considered to be influencing the formation of public consciousness on this issue are taken into account, and not those that are related to the laws of the functioning of the energy system as a physical object. It is shown that so far there is no general approach that could serve as the basis for the energy development strategy. The basic principles of building electric power systems are formulated, under which the development of energy in the conditions of uncontrolled development of the Internet of things looks preferable. The necessity of considering the energy system as an association of self-balancing nodes built according to a hierarchical principle is noted.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

KEYWORDS

ЭНЕРГЕТИКА, ЦИФРОВИЗАЦИЯ, ИНДУСТРИЯ 4.0, ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ, ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД

ENERGY, DIGITALIZATION, INDUSTRY 4.0, INTERNET OF THINGS, DIGITAL TRANSFORMATION, ENERGY TRANSITION

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

FOR CITATION

Тягунов М.Г. Цифровая стратегия энергетического перехода. *Технический оппонент.* 2022; 1 (8): 12–18.

Tyagunov M.G. Digital energy transition strategy. *Technicheskiy opponent = Technical Opponent.* 2022; 1 (8): 12–18.

Введение

В настоящее время в развитии энергетики можно отметить несколько важных тенденций. Они связаны с общей идеей цифровизации, а также с четвертой промышленной революцией (индустрией 4.0), цифровой трансформацией и энергетическим переходом, которые относятся непосредственно к энергетике, ее свойствам и структуре. Не выделяя их очередность или значимость, следует отметить только два разнонаправленных течения: стремление к построению

глобальной энергетической системы и бурное развитие распределенной генерации.

Масштаб дискуссии по поводу цифровизации во всех ее аспектах в большой степени обусловлен неясностью понятий и отсутствием строгих определений. Каждый ее участник использует обсуждаемые понятия в собственной интерпретации. И это не позволяет всем вовлеченным в дискуссию говорить на одном языке. Пожалуй, наиболее ясно классификацию указанных понятий дает Н. Алейник [1], а именно:



- цифровизация — это внедрение цифровых технологий в бизнес-модели компаний;
- индустрия 4.0 — концепция умного производственного процесса на основе промышленного интернета вещей (IoT), объединяющая физическое производство и операции с интеллектуальными цифровыми технологиями;
- интернет вещей — глобальная сеть подключенных к интернету устройств, которые могут взаимодействовать между собой с помощью встроенных способов передачи данных;
- цифровая трансформация — внедрение современных технологий в бизнес-процессы предприятия. Это подразумевает фундаментальные изменения в подходах к управлению, корпоративной культуре, внешним коммуникациям. Цифровизацию, индустрию 4.0 и интернет вещей можно назвать составляющими цифровой трансформации.

В приведенной классификации цифровизация — внедрение цифровых технологий обработки информации в производственные и управленческие процессы деятельности компаний. При этом следует подчеркнуть, что речь идет именно о данных, представленных в цифровом виде. То есть такая информация пригодна для обработки вычислительными устройствами дискретного действия. Это, естественно, меняет процесс управления, замещая, например, бумажный документооборот электронным, повышает обоснованность принимаемых решений благодаря возможности рассмотрения большего числа альтернативных вариантов, ускоряет процессы сбора, хранения, обработки и передачи данных, вносит в организацию работы компаний такие новые элементы, как дистанционная занятость или интернет-торговля, снижающие стоимость продукции за счет ненадобности строительства или аренды рабочих помещений. Однако нужно отметить, что сельскохозяйственное предприятие как выпускало сельскохозяйственную продукцию, так и будет выпускать ее и далее, а металлургический завод так и продолжит производить металл, а не его виртуальный образ.

Индустрия 4.0 — стратегия правительства Германии, принятая многими странами мира из-за четкости формулировки основных позиций. В определении ясно сказано, что это объединение физического производства с умными средствами управления. Причем отдельные элементы технологического процесса получают возможность обмениваться информацией между собой, ускоряя производственную деятельность. При этом вид и количество элементов технологического процесса не уточняются, но понимаются гораздо шире, чем просто части традиционных систем автоматического управления. Автоматизация и использование в управляющих решениях различных устройств, в том числе цифровых вычислительных, по мнению авторов концепции, характеризуют третий этап индустриального развития. Четвертая (нынешняя) стадия — это внедрение в производство комплексов, называемых киберфизическими системами и способных принимать решения и обрабатывать их в конкретной производственной операции. Из последних примеров можно привести изготовление отдельных деталей или даже строительных конструкций с помощью 3D-принтеров. При этом согласование действий отдельных частей

технологической цепочки производится без вмешательства человека путем обмена информацией между элементами данной системы.

Интернет вещей — глобальная сеть, аналогичная существующему алгоритму обмена данными между людьми. Но она обеспечивает обмен информацией между различными предметами промышленного, сельскохозяйственного, коммунального или бытового назначения. Это значит, что интернет вещей уже встроен в концепцию индустрии 4.0.

Цифровая трансформация объединяет все вышеотмеченные системы и конструкции. Однако это не добавляет ясности для понимания сути данного термина. Ниже приведено несколько примеров высказываний руководителей разного уровня различных организаций, которые довольно красочно иллюстрируют свободу интерпретации разными людьми одного и того же понятия.

«Цифровизация подразумевает модернизацию IT-составляющей, тогда как цифровая трансформация — это история про модернизацию бизнес-процессов компании, ее организационной системы» (Алексей Никифоров, руководитель подразделения технологических решений Hitachi Vantara).

«Многие технологические компании проходят стадию цифровой трансформации для того, чтобы выйти за рамки традиционного бизнеса и использовать новые информационные технологии. Максимально оперативно это получается реализовать технологическим гигантам и стартапам, которые быстро занимают цифровые ниши на рынке» (Дмитрий Кривицкий, лидер стрима «IT-трансформация» департамента цифрового бизнеса ВТБ).

Термин «стрим» не вполне понятен в данном контексте: это (от англ. stream — «поток») трансляция действий, происходящих на компьютере или игровой консоли в режиме реального времени [2], или STREAM. PM — подход (технология) построения методологий и систем управления проектами под потребности конкретного заказчика [3].

Из всего сказанного понятно только одно: никакая цифровая трансформация не заставит людей питаться виртуальными продуктами, а никакая информация, в том числе и в цифровом виде, не будет передаваться без затрат энергии.

Наиболее ясным можно считать понятие энергетического перехода. Это движение глобальной энергетики в направлении углеродной нейтральности, достигаемой благодаря отказу от ископаемого топлива и переходу к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ). Однако и здесь остается ряд непонятных моментов, связанных с понятиями «глобальная энергетика» и проблемами обеспечения гарантированной выработки энергетическими установками на основе ВИЭ. Кроме того, весь этот переход должен осуществляться в условиях четвертой промышленной революции и цифровой трансформации.

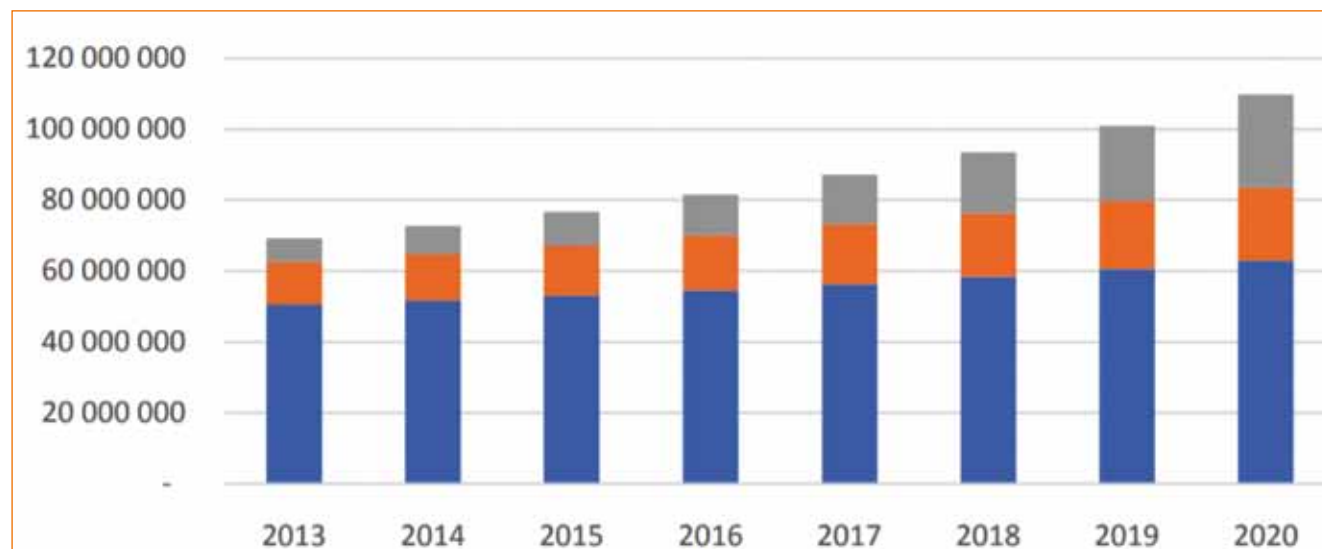
Цифровая трансформация и интернет энергии

Массовая цифровизация во всех ее качествах не может не повлиять на энергетику как на отрасль производства и на энергетические системы как на



РИСУНОК 1 Рост энергопотребления центров обработки данных, кВт (состояние на октябрь 2016 г.)

FIGURE 1 Data center power consumption growth, kW (status as of October 2016)



объединения промышленных и коммунально-бытовых потребителей, генераторов электрической мощности, систем передачи и распределения электроэнергии.

С одной стороны, на энергетическую область будет воздействовать рост потребления электроэнергии, с которым, безусловно, связаны интернет вещей и информационные центры глобальной сети обмена информацией. Значит, сбалансировать его будет возможно только путем наращивания мощности генерации, то есть посредством увеличения объема использования первичных энергетических ресурсов разного рода.

С другой стороны, внедрение умных устройств в технологические процессы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии и тепла повлияет на структуру и требования к гарантированной надежности и безопасности работы энергетических систем. А последние уже давно приобрели очертания современных киберфизических решений.

Как же можно будет оценить рост потребления только электрической энергии за счет цифровизации и IoT? По мнению одного из «главных цифровизаторов нашего времени» Г. Грефа [4], «...В 2020 году 20 млрд вещей будут подключены к интернету, и каждая из них будет каждую секунду генерировать данные». Пока нельзя сказать, сколько миллиардов вещей подключено к интернету. Но вполне возможно, что их число уже свыше 20 миллиардов. Если количество способных к обмену информацией вещей будет увеличиваться экспоненциально, как обычно в период роста, то и энергопотребление начнет повышаться по этому же закону.

Кроме IoT, есть еще и облачные хранилища данных, которые позволяют наращивать объем обмена информацией. Тем самым они создают новый бизнес — информационный. Рост возможности хранить информацию в неограниченном ресурсами своих компьютеров объеме ведет к его наращиванию и необходимости

появления реальных физических центров хранения данных, которые называют облачными.

Исследователи из Калифорнийского университета в Беркли и Международного института компьютерных наук считают, что интернет уже потребляет от 170 до 307 ГВт электрической мощности [5]. И хотя это составляло около 2% мирового электропотребления (по оценкам 2011 года), нужно помнить, что все было посчитано 11 лет назад без учета облачных хранилищ, построенных за прошедшее время, и тех миллиардов вещей, которые уже подключены к интернету и присоединяются к данному процессу в будущем.

Мировое потребление первичной энергии до XX века росло невысокими темпами. К 1800 году оно составляло менее 6 тыс. ТВт·ч, а к 1900-му выросло примерно вдвое — до 12 тыс. ТВт·ч в год. В XX веке произошло ускорение роста энергопотребления, и к 2019-му оно увеличилось до 160 тыс. ТВт·ч (или в 13 раз по сравнению с началом XX столетия) [6].

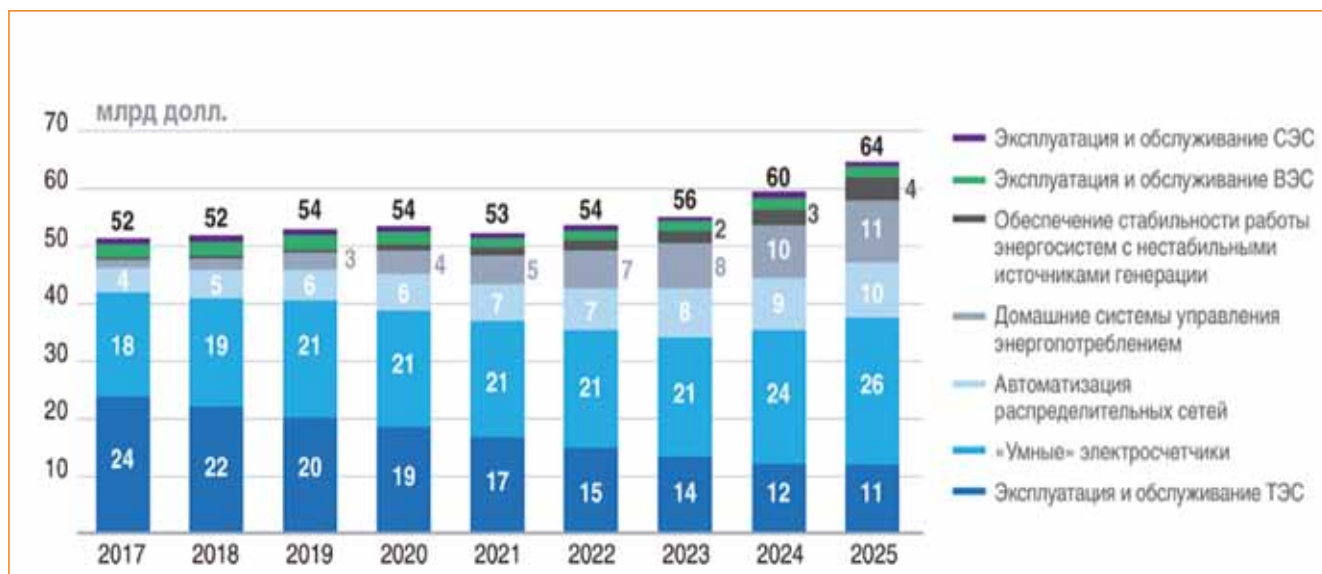
Энергоснабжение дата-центра Apple в Мейдене (Северная Каролина, США) обеспечивают 400 тыс. квадратных метров солнечных батарей, которые вырабатывают 42 млн кВт·ч в год. Этого хватает на обеспечение лишь около 60% серверов и систем охлаждения [7]. Следовательно, на энергоснабжение указанного дата-центра требуется еще 28 млн кВт·ч в год, что в сумме составит 70 млн кВт·ч. Это примерно равно годовому потреблению российского города численностью 10 тыс. человек.

Индустрия центров обработки данных (ЦОД) развивается бурно, как видно из **рис. 1** [8]. Конечно, это не только облачные хранилища (показаны на рисунке серым цветом), но их доля неуклонно растет. Среднегодовая мощность центров обработки данных к 2020 году должна была составить 180 ГВт. Но сведения придется скорректировать из-за влияния пандемии COVID-19. Тем не менее можно сказать, что мировая индустрия ЦОД потребляет в полтора раза большую мощность, чем центры обработки данных в Российской Феде-



РИСУНОК 2 Размер рынка цифровых технологий в энергетике

FIGURE 2 Market size of digital technologies in the energy sector



Примечания/Notes: млрд долл. — billions of dollars. Эксплуатация и обслуживание СЭС — Operation and maintenance of SPS. Эксплуатация и обслуживание ВЭС — Operation and maintenance of WPP. Обеспечение стабильности работы энергосистем с нестабильными источниками генерации — Ensuring the stability of power systems with unstable generation sources. Домашние системы управления энергопотреблением — Home energy management systems. Автоматизация распределительных сетей — Distribution networks automation. «Умные» электросчетчики — «Smart» electric meters. Эксплуатация и обслуживание ТЭС — Operation and maintenance of TPP.

рации (среднегодовое потребление в РФ — 123 ГВт), или в 30 раз больше, чем ЦОД в Москве (6 ГВт) [8].

Если к этому прибавить еще хотя бы 20 млрд участников интернета вещей средней мощностью (от компьютеров (0,3–0,4 кВт) до чайников, утюгов и пылесосов — 2 кВт) 0,5 кВт, то получим 10 ГВт, потребляемых вне всякого графика. К тому же мы не учитываем потребителей IoT в промышленности. Их мощность обычно превосходит показатели потребителей бытового назначения. Минэнерго России оценивает рост рынка цифровых технологий с 2020 до 2025 года только в энергетике в 1,2 раза, как видно из рис. 2 [9].

Правда, есть движение в сторону самообеспечения центров данных с помощью собственных энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии при размещении оборудования на глубине моря [10]. Об этом — проект Natick от Microsoft.

Другой аспект влияния цифровизации на энергетику состоит в изменении самих энергетических систем и правил их взаимодействия.

XIII ежегодная конференция (24 марта 2021 года) «Российская энергетика: как обеспечить баланс в новых условиях» сформулировала следующие проблемы и рекомендации [11]: «В 2020 упало потребление электроэнергии — сразу на 2,4%, если смотреть в среднем за год, но в отдельные периоды фиксировалось падение более 6% (данные СО ЕЭС)... Часть энергопотребления была перенесена на население. «Удаленка» сделала свое дело, что в свою очередь вызвало повышение задолженности на энергорынке... Все эти процессы заставляют задумываться о скором

пересмотре правил национального рынка электрической энергии и формировании новой парадигмы функционирования энергосистемы».

Новая парадигма развития энергетики

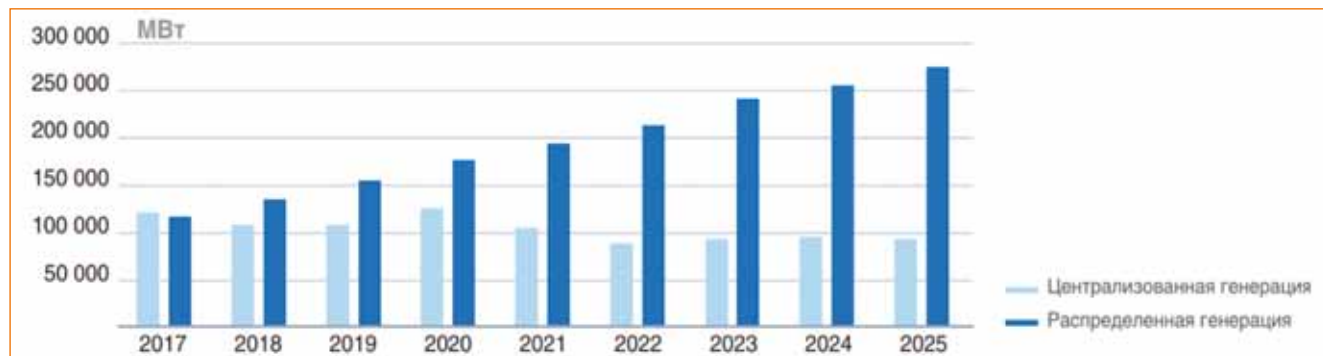
Новая парадигма развития энергосистем уже частично определилась в программах распределенной генерации. Минэнерго России отмечает ее преимущественный рост в структуре установленной мощности стран мира, что хорошо видно на рис. 3. В то же время основная модель единой энергосистемы России и рынка электроэнергии и мощности не претерпевает тех изменений, о которых только собираются задуматься, как отмечено выше в рекомендации конференции «Российская энергетика: как обеспечить баланс в новых условиях».

В развитии энергетики явно наблюдается тенденция глобализации по двум разным направлениям. Первое — это построение энергетической системы, структурно и функционально повторяющей глобальную сеть Интернет [12, 13]. Второе направление — развитие глобальной энергетической системы по принципам Организации по развитию и кооперации глобального энергетического объединения (GEIDCO) [14]. На конференции 23 марта 2021 года в Пекине [15] GEIDCO презентовала новую информационную платформу «Мир энергетических взаимосвязей» как часть глобальной



РИСУНОК 3 Прогноз ввода новой мощности генерации в мире

FIGURE 3 Forecast of new generation capacity commissioning in the world



Примечания/Notes. МВт — MW. Централизованная генерация — Centralized generation. Распределенная генерация — Distributed generation.

энергетической инициативы и развития зеленой и низкоуглеродной энергетики.

Глобальная энергетическая система должна стать основой электроснабжения будущего. Этот подход подразумевает сооружение мощных электростанций на основе возобновляемых источников энергии в труднодоступных, но обладающих высоким энергетическим потенциалом районах, связанных с потребителями энергии линиями передачи постоянного тока сверхвысокого напряжения.

Глобальная энергетическая инициатива предлагает глобальное решение проблемы устойчивого развития в области энергетики, климата, окружающей среды и ресурсов, а также и в инфраструктурном строительстве, модернизации промышленности, технологических инновациях и экономическом росте стран-участниц

Другой подход отражен в документах Национальной технологической инициативы «Энерджиет». Интернет энергии понимается как «киберфизическая инфраструктура для информационных систем децентрализованного интеллектуального (роботизированного) управления энергосистемами, энергоузлами, системами электроснабжения и интеграции в них распределенных активных потребителей электрической энергии, распределенных источников энергии и энергетической гибкости» [16]. Один из вариантов реализации подхода IDEA (Internet of Distributed Energy Architecture) — тип децентрализованной электроэнергетической системы. В ней реализовано интеллектуальное распределенное управление, осуществляемое благодаря энергетическим транзакциям между ее пользователями.

Энергетическая транзакция — базовое понятие, используемое в данном подходе. Оно определяется как акт взаимодействия двух и более субъектов энергосистемы, который состоит из трех слоев энергоинформационного обмена:

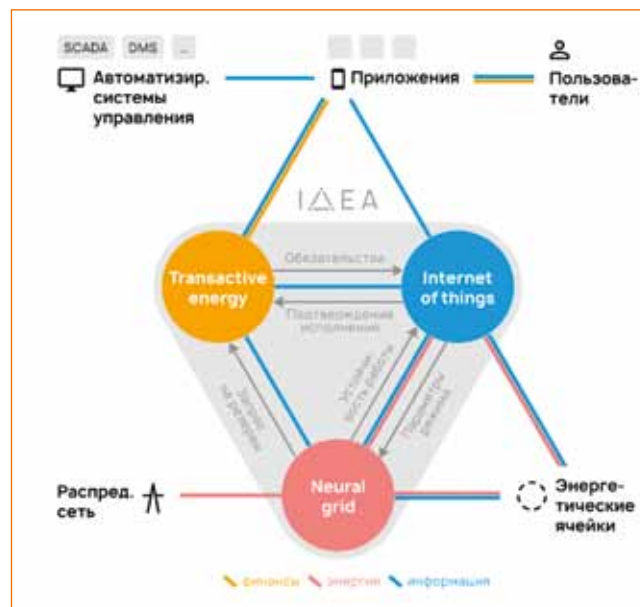
- финансово-договорного;
- информационно-управляющего;
- физического (электрического).

Взаимодействие транзакций представлено на рис. 4. В архитектуре IDEA оно строится на объединении трех элементов: Transactive Energy — системы

формирования, контроля исполнения и оплаты смарт-контрактов, Internet of Things — системы межмашинного взаимодействия и обмена управляющими воздействиями между энергетическим оборудованием, Neural Grid — системы, обеспечивающей режимное управление и поддержание статической и динамической устойчивости энергокомплекса.

РИСУНОК 4 Архитектура интернета энергии IDEA

FIGURE 4 IDEA energy internet architecture



Примечания/Notes. Автоматизир. системы управления — Automated control systems. Приложения — Applications. Пользователи — Users. Распред. сеть — Power Distribution Network. Энергетические ячейки — Power Cells. Обязательства — Obligations. Подтверждение исполнения — Confirmation of performance. Устойчивость работы — Operation resistance. Параметры режима — Mode Parameters. Запрос на резервы — Request for reserves. Финансы — Finance. Энергия — Energy. Информация — Information.



Если финансово-договорные и информационно-управляющие системы не вызывают какого-либо непонимания при объединении их в сеть, что уже сделано во многих отраслях и производствах, то «техническое соединение устройств с электрической сетью выполняется по принципу plug and play с гарантированным поддержанием статической и динамической устойчивости системы, несмотря на большое количество влияющих друг на друга устройств пользователей» [17]. И это не так ясно сформулировано, как требуется для реализации.

Согласно подходу IDEA, процедура функционирования интернета энергии представлена следующим образом: «Пользователи взаимодействуют с интернетом энергии через приложения, которые работают с платформой Transactive Energy и формируют смарт-контракт».

Из Transactive Energy информация об обязательствах по смарт-контракту передается в систему Internet of Things. Происходит согласование режимов работы оборудования.

Из системы Internet of Things на оборудование Neural Grid поступают параметры режима.

Neural Grid установит новый режим и передаст фактические данные об электрических параметрах обратно в Internet of Things.

Система Internet of Things за счет измерений подтверждает факт исполнения смарт-контрактов, сформированных в Transactive Energy.

Transactive Energy отобразит исполнение смарт-контракта путем перераспределения денежных средств между пользователями согласно его условиям.

Система Neural Grid может отправлять через Transactive Energy запрос на дополнительные ресурсы в случае невозможности установить требуемый режим.

Интернет энергии через Neural Grid подключается к распределительным электрическим сетям и устанавливает электрическую связь с внешней, централизованной энергосистемой.

Традиционные автоматизированные комплексы управления могут обмениваться данными с приложениями» [17].

Эта длинная цитата позволяет понять, что именно ожидается от построенного по предлагаемому принципу объединения, контролируемого в режиме оперативного управления.

Однако известно, что последнее обеспечивает бесперебойное энергоснабжение потребителей при наличии достаточных резервов, дающих гарантию бесперебойности. А это условие соблюдается планированием ресурсов и резервов. Последние нужно обеспечить необходимыми энергоресурсами, которые должны быть добыты и подведены к объекту генерации. Таким образом, в рамках управления энергетической системой важно реализовать комплекс мер планирования и оперативного управления, привязанный к временным характеристикам задач энергоснабжения, производства электроэнергии, распределения энергоресурсов, в том числе возобновляемых, и к другим нюансам обеспечения генерирующих установок энергоресурсами. Следовательно, приведенная выше модель не может быть общей концепцией построения энергосистемы будущего.

Но и концепция глобальной энергетики, предлагаемая GEIDCO, не гарантирует устойчивое развитие, так как мир стал очень чувствителен к политическим колебаниям, торговым войнам и санкционной борьбе. Экономические средства являются новым оружием, активно применяющимся в информационно-экономическом противостоянии, которое пока еще не хотелось бы называть войной. Поэтому идеальная для утопий XIX и XX веков глобальная энергетическая система вряд ли принесет человечеству XXI столетия благоденствие, так как локальные противоречия станут влиять на международные отношения все в большей мере. Это мы с сожалением видим в том глобальном расколе, который образовался на геополитической арене сегодня. Политические санкции вмешиваются в любые (в том числе в международные) экономические проекты, что уж говорить об энергетических программах, где баланс интересов участников обязан соблюдаться каждый момент времени.

Отсюда следует, что энергетическая стратегия стран должна строиться на принципах дружелюбности к природе (это наша общая среда обитания), максимальной независимости от внешних (последние годы показывают, что внешние партнерства все чаще становятся недружелюбными, так как защищают свои локальные интересы) поставщиков энергии или энергоресурсов, на собственных (первичного и вторичного передела) и человеческих ресурсах, которые будут нести свои (а не привнесенные) ценности, создающие и сохраняющие каждое из существующих обществ.

Простым выражением данной стратегии в части энергетики будет построение любой энергосистемы (от малой муниципальной до национальной и международной, в том числе глобальной) по принципу содружества самообеспеченных энергорайонов. Степень обеспеченности каждого энергорайона может быть разной. Но каждый должен обеспечивать свои критические нужды самостоятельно. И это будет лежать за пределами понятий экономики, станет вопросом выживания.

Может ли такой принцип реализоваться в рамках существующих подходов к управлению энергосистемами? Да, причем он уже реализуется. Т.А. Волкова и соавторы дают частичное описание системы управления энергокомплексом, связанной с внешней энергосистемой перетоков положительной, отрицательной и нулевой величины. Это значит, что идея соединения в энергетическое целое самобалансирующихся энергоузлов уже имеет вполне реальное воплощение [18].

Заключение

Из вышесказанного следует, что существует множество различных подходов к развитию принципов и путей строительства энергетики будущего.

Есть глобальные концепции, строящиеся на принципах интернета и других систем всемирного распространения.

Однако глобализация не должна влиять на индивидуальность развития отдельных стран и регионов. И это требует их ориентации на самообеспечение при сохранении разумного разделения труда.



Таким образом, стратегия развития энергетики должна строиться на основе объединения самобалансирующихся энергоузлов, имеющих возможно-

сти свободно переходить на параллельную работу с внешней энергосистемой и легко отключаться от нее по мере необходимости.

Литература/References

1. Алейник Н. Что такое цифровая трансформация и чем она отличается от цифровизации и индустрии 4.0 [Электронный ресурс]. URL: <https://rb.ru/story/what-is-digital-transformation/> (дата обращения: 11.12.2019). [Aleinik N. What is digital transformation and how it differs from digitalization and Industry 4.0 [Electronic resource]. URL: <https://rb.ru/story/what-is-digital-transformation/> (accessed 11.12.2019). (In Russ.)].
2. URL: <https://myrouble.ru/chto-takoe-strim-i-kak-zarabotat-nastrimah/>.
3. URL: <https://blog.pmpractice.ru/2020/11/16/5730/>.
4. Грег: интернет вещей приведет к вторжению в персональные данные людей [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20161028/1480201957.html> (дата обращения: 28.10.2016, обновлено: 03.03.2020). [Gref: Internet of things will lead to the invasion of people's personal data [Electronic resource]. URL: <https://ria.ru/20161028/1480201957.html> (access date: 28.10.2016, updated: 03.03.2020). (In Russ.)].
5. Сколько энергии использует Интернет? [Электронный ресурс]. URL: <https://texnomaniya.ru/internet-news/skolko-jenergi-ispolzuet-internet.html> (опубликовано: 01.11.2011). [How much energy does the Internet use? [Electronic resource]. URL: <https://texnomaniya.ru/internet-news/skolko-jenergi-ispolzuet-internet.html> (published: 01.11.2011). (In Russ.)].
6. Ерошенко С.А., Карпенко А.А., Кокин С.Е. и др. Научные проблемы распределенной генерации. Проблемы энергетики. 2010; 11–12: 126–133. [Eroshenko S.A., Karpenko A.A., Kokin S.E., et al. Scientific problems of distributed generation. Energy issues. 2010; 11–12: 126–133. (In Russ.)].
7. Где хранится интернет: 10 супермощных дата-центров [Электронный ресурс]. URL: <https://bigpicture.ru/gde-xranitsya-internet-10-supermoshnyx-data-centrov/>. [Where the Internet is stored: 10 very powerful data centers [Electronic resource]. URL: <https://bigpicture.ru/gde-xranitsya-internet-10-supermoshnyx-data-centrov/>. (In Russ.)].
8. Солодовников А. Тенденции мирового рынка ЦОДов. Актуальные вопросы [Электронный ресурс]. URL: http://spb.dcforum.ru/sites/default/files/10.20uptime_institute_iks_spb_oct_2017.pdf (октябрь 2017 года). [Solodovnikov A. Trends in the global data center market. Actual questions [Electronic resource]. URL: http://spb.dcforum.ru/sites/default/files/10.20uptime_institute_iks_spb_oct_2017.pdf (October 2017). (In Russ.)].
9. Цифровизация энергетики [Электронный ресурс]. URL: <https://in.minenergo.gov.ru/energynet/docs/Цифровая%20энергетика.pdf>. [Digitalization in energy sector [Electronic resource]. URL: <https://in.minenergo.gov.ru/energynet/docs/Цифровая%20энергетика.pdf>. (In Russ.)].
10. URL: <https://news.microsoft.com/ru-ru/features/project-natick/>.
11. Российская энергетика: как обеспечить баланс в новых условиях. XIII ежегодная конференция (24 марта 2021 года) [Электронный ресурс]. URL: <https://events.vedomosti.ru/events/electro21>. [Russian power industry: how to ensure balance in new conditions. XIII annual conference (March 24, 2021) [Electronic resource]. URL: <https://events.vedomosti.ru/events/electro21>. (In Russ.)].
12. Тягунов М.Г. Цифровизация и управление в распределенных энергетических системах с ВИЭ. В кн.: Роголев Н.Д., ред. Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития. М.: Издательство МЭИ, 2019: 187–203. [Tyagunov M.G. Digitalization and management in distributed energy systems with RES. In book: Rogalyov N.D., ed. Digital power engineering: a new paradigm of functioning and development. Moscow: MPEI Publishing House, 2019: 187–203. (In Russ.)].
13. Княгинина В.Н., Холкина Д.В. Цифровой переход в электроэнергетике России. Экспертно-аналитический доклад. 2017 [Электронный ресурс]. URL: https://www.csr.ru/uploads/2017/09/Doklad_energetika-Web.pdf. [Knyaginina V.N., Kholkina D.V. Digital Transition in Russian Electric Power Industry. Expert and analytical report. 2017 [Electronic resource]. URL: https://www.csr.ru/uploads/2017/09/Doklad_energetika-Web.pdf. (In Russ.)].
14. Чжэнья Л. Глобальное энергетическое объединение. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. [Zhenya L. The global energy alliance. Moscow: MPEI Publishing House, 2016. (In Russ.)].
15. URL: <http://eepir.ru/news/item/14826-geidco-wei.html>.
16. URL: <https://energynet.ru/>.
17. Internet of Distributed Energy Architecture. Архитектура интернета энергии — тип децентрализованной электроэнергетической системы, в которой реализовано интеллектуальное распределенное управление, осуществляемое за счет энергетических транзакций между ее пользователями [Электронный ресурс]. URL: <https://idea-go.tech/>. [Internet of Distributed Energy Architecture. Internet of Distributed Energy Architecture is a type of decentralized energy system, which implements intelligent distributed control through energy transactions between its users [Electronic resource]. URL: <https://idea-go.tech/>. (In Russ.)].
18. Волкова Т.А., Лыкин А.В., Фишов А.Г. и др. Распределенный расчет установившихся режимов электрических сетей. Электроэнергия. 2020; 1 (58): 28–33. [Volkova T.A., Lykin A.V., Fishov A.G., et al. Distributed calculation of steady-state modes of electric networks. Electricity. 2020; 1 (58): 28–33.

Вклад автора. М.Г. Тягунов: разработка дизайна исследования, изучение данных для анализа, обзор публикаций по теме статьи, статистический анализ полученных данных, написание текста рукописи.

Author contribution. M.G. Tyagunov: development of research design, obtaining data for analysis, review of publications on the topic of the article, statistical analysis of the data obtained, paper writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declares no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.
Financing. The study was performed without external funding.

Статья поступила: 27.12.2021. **Принята к публикации:** 25.01.2022.
Article received: 27.12.2021. **Accepted for publication:** 25.01.2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Тягунов Михаил Георгиевич, д.т.н., профессор Национального исследовательского университета «МЭИ». Адрес: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14. Телефон: +7 (495) 362-72-51. E-mail: TyagunovMG@mpei.ru. ORCID: 0000-0002-3061-2636.

AUTHOR INFORMATION

Tyagunov Mikhail Georgievich, DScTech, Professor, National Research University «MPEI». Address: 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250. Phone: +7 (495) 362-72-51. E-mail: TyagunovMG@mpei.ru. ORCID: 0000-0002-3061-2636.

УДК 537
UDC 537

Электрические и тепловые характеристики аргоновой дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона



Electrical and Thermal Characteristics of the Argon Arc in the Stabilization Zone of the Laminar Plasmatron

АВТОРЫ

AUTHORS

А.М. Кручинин, д.т.н., профессор,
М.Я. Погребисский, к.т.н., доцент,
Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин

A.M. Kruchinin, M.Ya. Pogrebisskiy,
E.S. Ryazanova, A.Yu. Chursin

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Россия

National Research University «MPEI», Moscow, Russia

РЕЗЮМЕ

SUMMARY

С использованием метода универсальных характеристик электрической дуги и теплообменной модели дуги струйных плазматронов проведен расчет электрических и тепловых характеристик стабилизированной дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона. Получены значения напряженности электрического поля и температурных параметров. Приведено сравнение рассчитанных данных с указанными в литературе экспериментальными сведениями, полученными для стабилизированной стенками разрядного канала аргоновой дуги.

Using the method of universal arc characteristics and the jet plasma arc heat transfer model, the calculation of electrical and thermal characteristics of the stabilized arc in the stabilization zone of the laminar plasmatron is carried out. Values of electric potential gradient and arc temperature parameters are calculated. The calculated data are compared with the experimental data obtained experimentally for the argon arc stabilized by the walls of the discharge channel, which are well known in the scientific literature.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

KEYWORDS

ДУГОВОЙ СТРУЙНЫЙ ПЛАЗМОТРОН, ЛАМИНАРНЫЙ ПЛАЗМОТРОН, СТАБИЛИЗИРОВАННАЯ ДУГА, ТЕПЛООБМЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ, НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

ARC JET PLASMATRON, LAMINAR PLASMATRON, STABILIZED ARC, ELECTRIC ARC HEAT TRANSFER MODEL, TEMPERATURE FIELD

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

FOR CITATION

Кручинин А.М., Погребисский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю. Электрические и тепловые характеристики аргоновой дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона. *Технический оппонент*. 2022; 1 (8): 19–23.

Kruchinin A.M., Pogrebisskiy M.Ya., Ryazanova E.S., Chursin A.Yu. Electrical and thermal characteristics of the argon arc in the stabilization zone of the laminar plasmatron. *Technicheskiy opponent = Technical Opponent*. 2022; 1 (8): 19–23.

Введение

Электротермические генераторы плазмы (струйные плазматроны) широко используются для проведения технологических процессов обработки металлов: для плавки металлов и сплавов, сварки, резки, размерной обработки, нанесения покрытий. Кроме того, они применяются при переработке отходов, в плазмохимических процессах (реакции в газовой фазе при высокой температуре). Особенной технологической эффективностью обладают плазматроны с ламинарной плазменной струей. Большие значения среднemasсовой температуры и высокая проникающая способность такой струи в окружающей газовой среде обуславливают широкие возможности ее использования в различных областях плазменной технологии. Особенно при нанесении различных покрытий, когда ее ламинарный характер обеспечивает отсутствие кратковременных

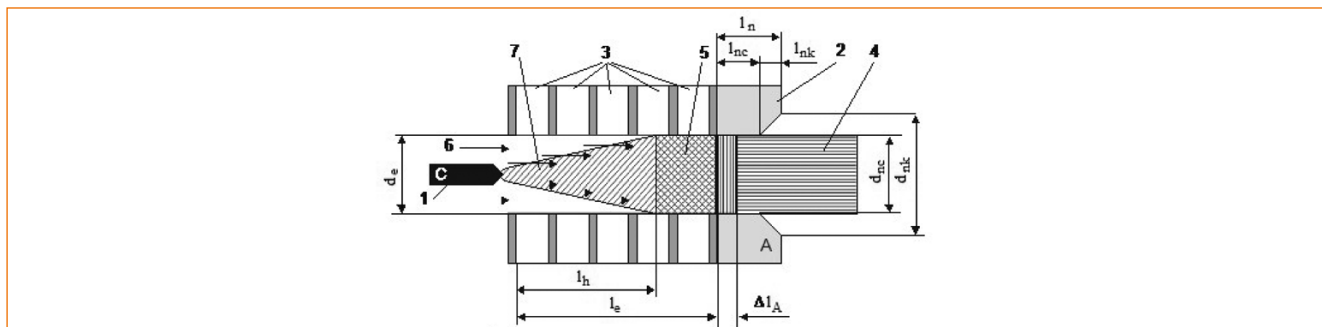
перебоев в работе, стабильность режимов температуры и движения частиц, структурного и фазового состава покрытия и увеличение коэффициента выхода готовой продукции. Ламинарные плазматроны также характеризуются большим сроком службы.

Однако формирование такой струи с использованием осевого струйного плазматрона сталкивается с фундаментальными, зачастую невыполнимыми физическими условиями. Если имеется развитый пристеночный слой потока газа на выходе разрядного канала плазматрона, то даже при ламинарном характере потока затем (с точки зрения гидродинамической устойчивости [1]) газодинамическая структура в виде концентрических околоосевых плазменных потоков в ламинарной струе и внешнего потока холодного газа неустойчива. Высокий градиент температуры и интенсивные гидродинамические возмущения на границе раздела этих потоков приводят к распаду



РИСУНОК 1 Структура электродугового ламинарного плазматрона: 1 — катод; 2 — анод; 3 — межэлектродные вставки (секции разрядного канала); 4 — ламинарная плазменная струя; 5 — зона стабилизации ламинарной струи; 6 — поток газа в разрядном канале; 7 — область турбулентного потока плазмы; l_e — длина разрядного канала; l_h — участок нагрева газа дугой; d_{nc} — диаметр цилиндрической части канала сопла; d_{nk} — диаметр выходного сечения конусной части канала сопла; Δl_A — участок привязки анодного пятна; d_e — диаметр разрядного канала плазматрона

FIGURE 1 Structure of the electric arc laminar plasmatron: 1 — cathode; 2 — anode; 3 — interelectrode inserts (sections of the discharge channel); 4 — laminar plasma jet; 5 — laminar jet stabilization zone; 6 — gas flow in the discharge channel; 7 — region of turbulent plasma flow; l_e — discharge channel length; l_h — gas arc heating area; d_{nc} — diameter of the cylindrical part of the nozzle channel; d_{nk} — diameter of the outlet section of the conical part of the nozzle channel; Δl_A — anode spot binding area; d_e — diameter of the discharge channel of the plasmatron



плазменной струи непосредственно на выходе сопла плазматрона.

Непрерывным условием устойчивости ламинарной струи на выходе плазматрона является отсутствие пристеночного потока холодного газа. Весь выходной участок разрядного канала плазматрона должен быть заполнен такой струей, образованной столбом электрической дуги (рис. 1). В качестве индикатора устойчивости ламинарной плазменной дуги выступает степень ее сжатия стенками в зоне стабилизации (позиция 5 на рис. 1) ламинарного плазматрона.

Для обеспечения степени сжатия дуги, требуемой для формирования стабильной ламинарной струи в разрядном канале плазматрона, его конструкция и система водяного охлаждения должны обеспечивать теплоотвод при интенсивной тепловой нагрузке на внутреннюю поверхность разрядного канала. Это реализуется путем применения секционированного выпускного канала с водоохлаждаемыми медными межэлектродными вставками с отдельной системой охлаждения (рис. 1) или в плазматроне с интегрированной системой водяного охлаждения секций (рис. 2) [2].

Степень сжатия дуги и ее электрические и тепловые характеристики могут быть рассчитаны методом ее универсальных характеристик [3].

Опубликованные характеристики [4] разработанного японскими специалистами действующего ламинарного аргонового плазматрона позволили авторам данной статьи на основе методов теплообменной модели стабилизированной электрической дуги обосновать требуемую степень ее сжатия стенками в зоне стабилизации плазматрона для формирования ламинарной струи плазмы [5].

Наиболее подходящим рабочим газом для такого плазматрона является аргон. Для аргоновой дуги требуемая минимальная степень сжатия составляет

$$\delta_r = \frac{2 \cdot r_a}{d_e} = 0,962, \quad (1)$$

где r_a — радиус стабилизированной дуги; d_e — диаметр разрядного канала в зоне стабилизации ламинарного плазматрона.

При проектировании ламинарных плазматронов необходимо прогнозировать электрические и тепловые характеристики дуги в зоне стабилизации при достижении режима устойчивой ламинарной струи на выходе плазматрона. Разработке метода такого прогнозирования посвящена данная статья.

Метод универсальных характеристик стабилизированной дуги

Преобладание процесса молекулярной теплопроводности над конвективным переносом тепла в столбе сжатой стенками дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона позволяет принять для расчета характеристик такой модели стабилизированной дуги следующие условия:

$$p_\lambda = \frac{2\pi}{\ln(1/\delta_r)} \cdot [S(T_{sa}) - S(T_w)], \text{ Вт/м}, \quad (2)$$

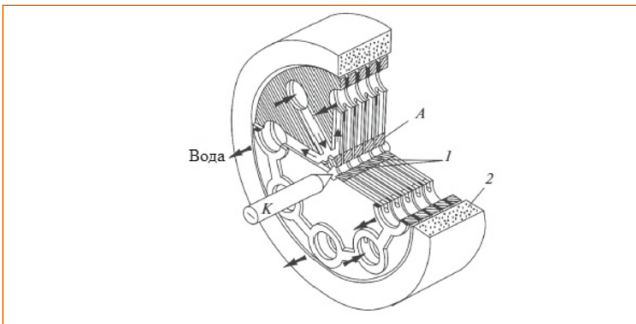
$$p_\lambda = \frac{2\pi \cdot S(T_{sa})}{\ln(1/\delta_r)} \cdot \frac{0,5 \cdot S(T_{sa}) \cdot (T_{sa} - T_w)}{T_{sa} \int_{T_w}^{T_{sa}} S(T) \cdot dT}, \text{ кВт/м},$$

где p_λ — линейная плотность теплового потока на поверхности столба, вызванного теплопроводностью плазмы; T_{sa} — изотерма поверхности столба дуги; T_w — температура поверхности стенки разрядного канала; $S(T)$ — тепловая функция или тепловой потенциал плазмы.



РИСУНОК 2 Конструкция разрядного канала плазматрона с интегрированной системой водяного охлаждения секций: 1 — разрядный канал; 2 — корпус плазматрона; А — анод; К — катод

FIGURE 2 Design of the discharge channel of the plasmatron with integrated system of water cooling of sections: 1 — discharge channel; 2 — plasmatron body; А — anode; К — cathode



Примечание/Note. Вода — Water.

Условием режима стабилизированной дуги является отсутствие в объеме столба конвективного рассеяния энергии электрического поля. Это позволяет получить решение уравнения энергии дуги как уравнения Эленбааса — Геллера с учетом нелинейности характеристики электропроводности плазмы $\sigma(S)$ [5, 6]. Решение получено в виде зависимости температурного профиля столба для относительного радиуса от линейной плотности теплового потока на поверхности столба, вызванного теплопроводностью плазмы p_λ .

$$\left. \begin{aligned} S_j(\tilde{r}) &= S_{Sa} + \frac{p_\lambda}{7,843} \cdot J_0(2,405 \cdot \tilde{r}); \\ S(\tilde{r}) \\ 2 \cdot \int_{S_{Sa}} \sigma(S) dS &= (S_j(\tilde{r}) - S_{Sa}) \cdot \sigma(S_j(\tilde{r})) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (3)$$

$$\Rightarrow S(\tilde{r}) \Rightarrow S(T) \Rightarrow T(\tilde{r}) = f(p_\lambda),$$

где J_0 — функция Бесселя нулевого порядка.

На основе решения 3 сотрудниками МЭИ был предложен способ формирования универсальных теплофизических характеристик дуги, которые зависят только от рода плазмообразующего газа и граничного параметра столба p_λ (2) с учетом решения 3:

- универсальная характеристика электрической проводимости дуги:

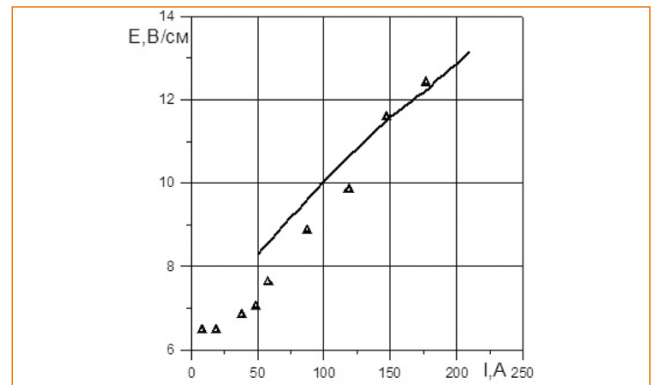
$$\tilde{g}(p_\lambda) = 2\pi \int_0^1 \sigma(T(\tilde{r})) \cdot \tilde{r} d\tilde{r}, \frac{\text{СМ}}{\text{М}}; \quad (4)$$

- универсальная характеристика излучения дуги:

$$\tilde{p}_\epsilon(p_\lambda) = 2\pi \int_0^1 \sigma_\epsilon(T(\tilde{r})) \cdot \tilde{r} d\tilde{r}, \frac{\text{КВТ}}{\text{М}^3}. \quad (5)$$

РИСУНОК 3 Электрические характеристики напряженности электрического поля стабилизированной аргоновой дуги в канале диаметром $d_e = 6$ мм

FIGURE 3 Electrical characteristics of electric potential gradient of a stabilized argon arc in a channel with a diameter of $d_e = 6$ mm



Примечание/Note. E, В/см — E, V/cm.

Универсальные характеристики дуги (4, 5) позволяют связать интегральные характеристики стабилизированной дуги с граничным параметром столба p_λ , отражающим условие теплообмена дуги, сжатой стенками разрядного канала плазматрона, с помощью алгебраических уравнений:

- линейной проводимости столба:

$$g = \tilde{g}(p_\lambda) \cdot r_a^2, \text{СМ} \cdot \text{М}; \quad (6)$$

- линейной плотности мощности излучения столба:

$$p_\epsilon = \tilde{p}_\epsilon(p_\lambda) \cdot r_a^2, \text{КВТ} / \text{М}; \quad (7)$$

- радиуса столба:

$$r_a^2 = \sqrt{0,25 \cdot \left[\frac{p_\lambda}{\tilde{p}_\epsilon(p_\lambda)} \right]^2 + \frac{I^2}{\tilde{p}_\epsilon(p_\lambda) \cdot 10^3 \cdot \tilde{g}(p_\lambda)} - 0,5 \cdot \frac{p_\lambda}{\tilde{p}_\epsilon(p_\lambda)}}, \text{М}^2, \quad (8)$$

где I — ток дуги, А;

- напряженности электрического поля столба:

$$E = \frac{I}{\tilde{g}(p_\lambda) \cdot r_a^2}, \text{В} / \text{М}. \quad (9)$$

Следует отметить, что уравнения интегральных характеристик дуги (6–9) благодаря включенным универсальным характеристикам дуги содержат процедуру расчета температурного профиля столба стабилизированной дуги для заданного рода газа.

Выражение 8 получено на основе выражения для баланса энергии $I \cdot E = p_\lambda + p_\epsilon$ и закона Ома для столба дуги (9).



Результаты расчета характеристик аргоновой дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона

Решение системы нелинейных алгебраических уравнений (6–9) с учетом рассчитанных универсальных характеристик дуги (4–5) выполнено методом последовательных приближений в цикле параметра столба P_λ . На рис. 3 приведена рассчитанная электрическая характеристика напряженности электрического поля аргоновой дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона с диаметром разрядного канала $d_e = 6$ мм.

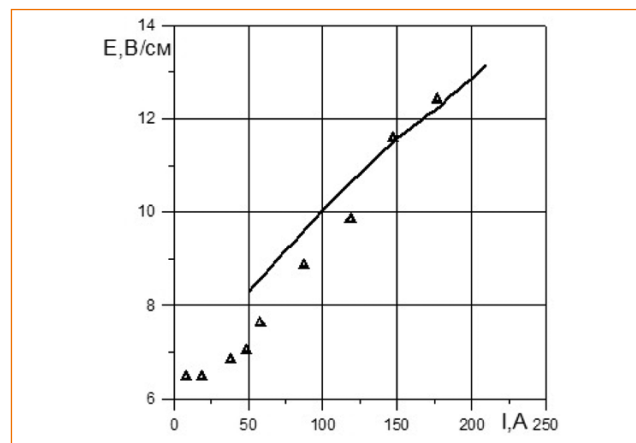
На этом же рисунке показаны точки измеренных значений напряженности электрического поля аргоновой стабилизированной дуги. Данные получены на экспериментальном плазматроне с объединенной системой водяного охлаждения межэлектродных вставок, допускающей тепловые нагрузки на стенки разрядного канала для аргоновой дуги до $q_{sc} = 20$ Вт/мм². Сравнение рассчитанной и экспериментальной электрических характеристик напряженности электрического поля стабилизированной аргоновой дуги подтверждает практическую адекватность метода ее универсальных характеристик в расчетах характеристик дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона.

На рис. 4 приведена рассчитанная зависимость степени сжатия дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона от тока при том же диаметре канала (6 мм).

Как следует из этого рисунка, стабилизация ламинарной струи аргоновой плазмы диаметром $d_e = 6$ мм возможна в ламинарном плазматроне в соот-

РИСУНОК 4 Зависимость степени сжатия аргоновой дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона с диаметром разрядного канала $d_e = 6$ мм от тока

FIGURE 4 Dependence of the compression ratio of the argon arc in the stabilization zone of a laminar plasmatron with a discharge channel diameter of $d_e = 6$ mm from the current



Примечание/Note. E, В/см — E, V/cm.

ветствии с условием 1 только при значениях тока не менее 125 А.

Рассчитанные характеристики дуги в зоне стабилизации ламинарного плазматрона с диаметром разрядного канала $d_e = 6$ мм имеют определенные значения, в том числе:

ТАБЛИЦА 1 Расчетные и экспериментальные значения параметров стабилизированной аргоновой дуги в зоне стабилизации ламинарных плазматронов

Параметры		Диаметр разрядного канала, мм / ток дуги, А	
		6/207	7/175
Расчет	Напряженность эл. поля E, В/м	1301,5	1020
	Температура на оси дуги T_0 , К	16358	14428
	Средняя температура дуги T_{sr} , К	12947	11782
	Степень сжатия	0,9821	0,9683
Эксперимент	Напряженность эл. поля E, В/м	1300	1019
	Температура на оси дуги T_0 , К	13250	13100

TABLE 1 Calculated and experimental values of the parameters of a stabilized argon arc in the stabilization zone of laminar plasmatrons

Parameters		Discharge channel diameter, mm / arc current, A	
		6/207	7/175
Calculation	Electric potential gradient E, V/m	1301,5	1020
	Temperature on the arc axis T_0 , K	16358	14428
	Average arc temperature T_{sr} , K	12947	11782
	Compression ratio	0,9821	0,9683
Experiment	Electric potential gradient E, V/m	1300	1019
	Temperature on the arc axis T_0 , K	13250	13100



- степень сжатия дуги $\delta_r = 0,9626$;
- напряженность электрического поля — 1082 В/м;
- линейная плотность теплового потока, вызванного теплопроводностью плазмы, на поверхности столба $p_\lambda = 102,75$ кВт/м;
- линейная плотность теплового потока, вызванного излучением плазмы, на поверхности столба $p_\epsilon = 32,53$ кВт/м;
- температура на оси столба — 13884 К;
- средняя температура столба — 11425 К;
- температура изотермы на поверхности столба $T_{sa} = 5903$ К.

В табл. 1 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений параметров стабилизированной аргоновой дуги, относящихся к зоне стабилизации ламинарных плазмотронов с диаметром ламинарной плазменной аргоновой струи 6 и 7 мм. Сравнение расчетных и опытных значений параметров аргоновой дуги в условиях теплообмена столба в зоне стабилизации ламинарного плазмотрона указывает на хорошее совпадение в определении напряженности электрического поля. Значительное расхождение в температурных параметрах дуги обусловлено возможными

погрешностями в задании теплофизических характеристик аргоновой плазмы. Не исключены также значительные погрешности в измерении температуры дуги в сравнении с определением напряженности электрического поля. Тем не менее порядок величин измеренных температурных параметров стабилизированной дуги соответствует расчетным значениям.

Заключение

На основе разработанного метода универсальных характеристик дуги предложен аналитический способ расчета характеристик стабилизированной дуги, сжатой стенками разрядного канала плазмотрона. Он учитывает нелинейные качества теплофизических свойств плазмообразующего газа, условия теплообмена дуги со стенкой разрядного канала при расчете ее температурного профиля. Это позволяет с высокой степенью достоверности спрогнозировать электрические и тепловые характеристики дуги в зоне стабилизации ламинарного плазмотрона при достижении режима устойчивой ламинарной струи на выходе плазмотрона.

Литература/References

1. Krouchinin A.M., Sawicki A.A Theory of electrical arc heating. Czestochowa: Tech. Univ. Czestochowa, 2003.
2. Асиновский Е.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. М.: Физматлит, 2008. [Asinovskii E.I., Kirillin A.V., Nizovskii V.L. Stabilized electric arcs and their application in thermophysical experiments. Moscow: Fizmatlit, 2008. (In Russ.)].
3. Кручинин А.М., Рязанова Е.С., Фоменко О.Я. К теории динамической дуги в электротехнологических установках. Межвузовский сборник научных трудов «Оптимизация работы электрооборудования». Тверь: ТГТУ, 1995: 28–33. [Krouchinin A.M., Ryzanova E.S., Fomenko O.Ya. On the theory of the dynamic arc in electrotechnological installations. Interuniversity collection of scientific papers «Optimization of electrical equipment». Tver: Tver State Technical University, 1995: 28–33. (In Russ.)].
4. Osaki K., Fukumasa O., Kobayashi A. High thermal efficiency-type laminar plasma jet generator for plasma processing. Vacuum. 2000; 59: 47–54.
5. Krouchinin A.M., Pogrebisskiy M.Ya., Ryzanova E.S., Chursin A.Yu. Conditions for plasma jet formation in a laminar plasmatron. Inorganic Materials: Applied Research. 2019; 3 (10): 572–577.
6. Кручинин А.М. Теплообменная модель дуги дуговой печи постоянного тока (часть 2). Электротехнология. 2012; 4: 39–48. [Krouchinin A.M. Heat transfer model of DC arc furnace (part 2). Electrometallurgy. 2012; 4: 39–48. (In Russ.)].

Вклад авторов. А.М. Кручинин, М.Я. Погребисский, Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин: разработка дизайна исследования, изучение данных для анализа, обзор публикаций по теме статьи, статистический анализ полученных данных, написание текста рукописи.

Authors contributions. A.M. Krouchinin, M.Ya. Pogrebisskiy, E.S. Ryzanova, A.Yu. Chursin: development of research design, obtaining data for analysis, review of publications on the topic of the article, statistical analysis of the data obtained, paper writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила: 27.12.2021. **Принята к публикации:** 25.01.2022. **Article received:** 25.12.2021. **Accepted for publication:** 25.01.2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кручинин Анатолий Михайлович, д.т.н., профессор, научный консультант кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий*.

Погребисский Михаил Яковлевич, к.т.н., доцент, директор Института электротехники и электрификации*.

Рязанова Елена Сергеевна, ведущий инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий*.

Чурсин Андрей Юлианович, заведующий лабораторией кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий*.

* Национальный исследовательский университет «МЭИ». Адрес: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1. Телефон: +7 (495) 362-77-73. E-mail: info@mpei.ru.

AUTHORS INFORMATION

Krouchinin Anatoliy Mikhailovich, DScTech, Professor, Scientific consultant of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies*.

Pogrebisskiy Mikhail Yakovlevich, PhD in Technology, Associate Professor, Director of Institute of Electrical Engineering and electrification*.

Ryzanova Elena Sergeevna, Leading engineer of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies*.

Chursin Andrey Yulianovich, Head of laboratory of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies*.

*National Research University «MPEI». Address: 14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250. Phone: +7 (495) 362-77-73. E-mail: info@mpei.ru.



УДК 622.236:622.233.52
UDC 622.236:622.233.52

Применение гидроструйных технологий в горном производстве



The Use of Water Jet Technology in Mining

АВТОРЫ

AUTHORS

В.Г. Мерзляков¹, д.т.н., профессор,
И.В. Деревяшкин^{1, 2}, д.т.н., профессор

¹ Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

² Филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Губкин, Россия

V.G. Merzlyakov¹,
I.V. Derevyashkin^{1, 2}

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² National University of Science and Technology «MISIS», Gubkin, Russia

РЕЗЮМЕ

SUMMARY

Использование гидроструйных технологий является одним из перспективных направлений развития техники, решающих вопросы повышения производительности и безопасности проведения очистных, подготовительных и вспомогательных работ на шахтах. В данном исследовании рассматриваются преимущества применения высокоскоростных струй воды для резания горных пород и твердых материалов.

The use of water jet technology is one of the promising areas of technology development, which helps to increase productivity and safety of mining, preparatory and auxiliary works in mines. This paper considers the advantages of using high-speed water jets for cutting rocks and solid materials.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

KEYWORDS

ГИДРОСТРУЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ СТРУИ ВОДЫ, ПРОХОДЧЕСКИЕ КОМБАЙНЫ, ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ

WATER JET TECHNOLOGY, HIGH-SPEED WATER JETS, TUNNELLING MACHINES, HYDROMECHANICAL ACTUATORS

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

FOR CITATION

Мерзляков В.Г., Деревяшкин И.В. Применение гидроструйных технологий в горном производстве. Технический оппонент. 2022; 1 (8): 24–27.

Merzlyakov V.G., Derevyashkin I.V. The use of water jet technology in mining. *Technicheskiy opponant = Technical Opponent*. 2022; 1 (8): 24–27.

Введение

Использование энергии высокоскоростных струй воды для резания горных пород и твердых материалов (гидроструйные технологии) получило признание во всем мире как одно из перспективных направлений развития техники, способных решать вопросы повышения производительности и безопасности проведения очистных, подготовительных и вспомогательных работ на шахтах.

В настоящее время одной из причин, сдерживающих высокие темпы проведения подготовительного рабочего процесса в горнорудных отраслях промышленности, является отсутствие высокопроизводительного, доступного по цене, надежного отечественного комбайна, способного проходить горные выработки по породам с прочностью на одноосное сжатие до 100 МПа и более и абразивностью свыше 18 мг по Л.И. Барону и А.В. Кузнецову. Легкие проходческие машины типа ГПКС не могут решать указанные задачи, а более тяжелые, такие как КП-25, КП-200, 4ПП-2М и др., несмотря на многочисленные попытки их модернизации, не соответствуют мировому уровню как по производительности и надежности, так и по уровню пылевзрывозащиты.

В то же время необходимо отметить, что на шахтах РФ одной из основных причин воспламенений метана и угольной пыли при работе выемочных и проходческих комбайнов является высокотемпературное «пятно» в месте фрикционного контакта резца с разрушаемой породой. Взрывы и загорания этого газа составляют 96% от общего числа аварий, происходящих в связи с нарушением пылегазового режима. Вспышки метана, даже локального характера, опасны тем, что они могут привести к крупным взрывам газопылевоздушных смесей и, соответственно, к большим человеческим, материальным и финансовым потерям.

Аналогичная ситуация складывается и за рубежом. Так, в США в результате фрикционного искрения резцов при разрушении угольного массива режущими инструментами происходит около 50% вспышек метана, в ЮАР — до 70% случаев его воспламенения.

Гидромеханический способ разрушения

Повышение производительности и безопасности проведения выработок по крепким и абразивным породам возможно с помощью проходческого комбайна нового технического уровня, использующего гидро-



струйные технологии в конструкции исполнительных органов [1, 2].

Гидромеханический способ разрушения основан на комбинированном воздействии на горный массив высокоскоростной струи воды давлением 30–70 МПа и более и механического инструмента скальвающего действия (рис. 1, а) или режущего (рис 1, б) действия. Струя, нарезаая в массиве опережающие щели или создавая в нем динамические напряжения без нарезания щели, ослабляет разрушаемый массив. Это способствует снижению усилий, действующих на механический инструмент.

Проникая в микро- и макротрещины, струя воды увлажняет продукты разрушения. Вследствие этого происходит не только резкое снижение пылеобразования (на 70–85%), но и существенное уменьшение температуры реза и его следа. Высокая эжектирующая способность высокоскоростных струй воды, обеспечивающая вынос из забоя выделяющегося метана и образование вокруг исполнительного органа водяного тумана, резкое (в 1,5–2 раза и более) сокращение нагрузок на механическом инструменте и искрообразования на 90–100% — все это также гарантирует эффективную взрывозащиту от фрикционного искрения. Использование в конструкции указанных комбайнов гидромеханических исполнительных органов обеспечивает повышение производительности и расширение области их применения на более крепкие и абразивные породы практически без увеличения массы машины.

Созданием опытно-промышленных и серийных образцов проходческих комбайнов с гидромеханическими исполнительными органами в разное время занимались зарубежные фирмы «Андерсон Стратклайд», «Доско Оверсиз Инжиниринг» (Великобритания), «Демаг», «Паурат», «Вирт», «Хомельман» (Германия), «Тайсей», «Нихон» (Япония), «Роббинс», «Флоу Индастриз», «Флоу Рисерч», «Кеннаметал» (США), «Сандвик» (Швеция), «Фест-Альпине» (Австрия) и другие.

В России наиболее комплексно эти вопросы решают ННЦ ГП — ИГД им. А.А. Скочинского, ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод», ТРО МОО «Академия горных наук» и Тульский государственный университет [3].

Работы проводятся в таких направлениях, как:

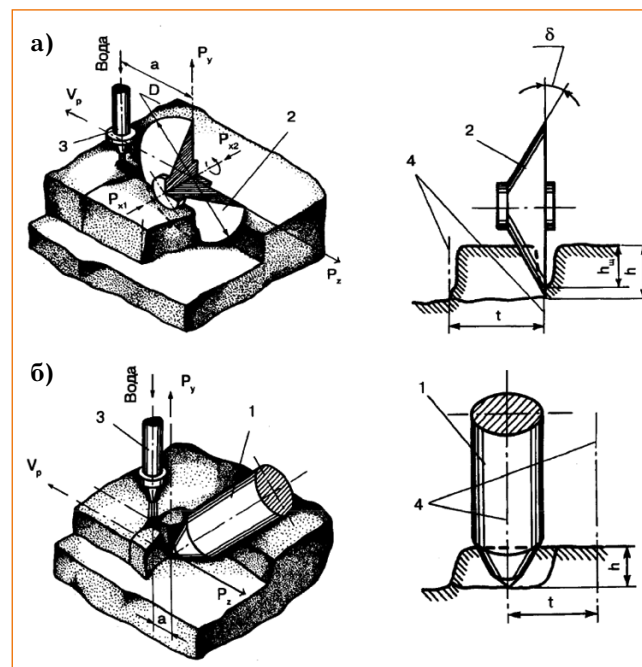
- разработка и создание гидромеханических исполнительных органов проходческих комбайнов, где вода играет комплексную роль инструмента разрушения, подавления пыли и пылевзрывозащиты;
- разработка и создание систем высоконапорного орошения машин, где вода является лишь инструментом подавления пыли и пылевзрывозащиты.

При этом в первую очередь предполагалось решить следующие задачи: исключить пыле- и искрообразование; уменьшить расход резов, повысить производительность проходческих комбайнов без увеличения их массы и установленной мощности двигателей исполнительных органов.

Разработаны две схемы компоновки гидравлического оборудования на машинах с гидромеханическими исполнительными органами: с автономным источником воды высокого давления, когда прео-

РИСУНОК 1 Схемы гидромеханического разрушения угля и горных пород: а — струей воды и механическим инструментом скальвающего действия (дисковой шарошкой); б — струей воды и режущим инструментом; 1 — резец; 2 — дисковая шарошка; 3 — струеформирующее устройство; 4 — линия резания; P_z, P_y, P_x — усилия (резания, подачи и боковое), действующие на механический инструмент; а — опережение струи воды; V_p — скорость резания; h — глубина стружки; f — шаг резания; $h_{щ}$ — глубина опережающей щели; D, δ — диаметр и угол заострения клиновидного обода дисковой шарошки

FIGURE 1 Schemes of hydro-mechanical destruction of coal and rocks: a — with water jet and mechanical tool of tearing action (disk roller cutter); b — with water jet and cutting tool; 1 — cutter; 2 — disk roller cutter; 3 — jet forming device; 4 — cutting line; P_z, P_y, P_x — forces (cutting, feed and lateral) acting on the mechanical tool; a — water jet advancing; V_p — cutting speed; h — shear depth; f — step of cutting; h_h — depth of advancing slot; D, δ — diameter and angle of sharpening of disk roller cutter wedge rim.



Примечание/Note. Вода — Water.

бразователь давления вынесен на корпус комбайна или за его пределы, либо со встроенным в режущую коронку преобразователем давления (рис. 2).

Результаты НИОКР, выполненных в РФ при нашем участии, и анализ тенденций создания совре-



РИСУНОК 2 Схема компоновки комбайна с гидромеханическим рабочим органом со встроенным источником воды высокого давления: 1 — приводной насосный блок; 2 — гидрооборудование; 3 — блок управления зонами; 4 — гидросъемник; 5 — преобразователь давления; 6 — коронка; 7 — водосъемник низкого давления; 8 — дополнительное электрооборудование; 9 — подпиточный насос; 10 — фильтр тонкой очистки

FIGURE 2 Layout of the harvester with hydromechanical working element with an integrated high-pressure water source: 1 — drive pumping unit; 2 — hydraulic equipment; 3 — zone control unit; 4 — water pick; 5 — pressure transducer; 6 — head; 7 — low pressure spillway; 8 — additional electrical equipment; 9 — booster pump; 10 — fine filter

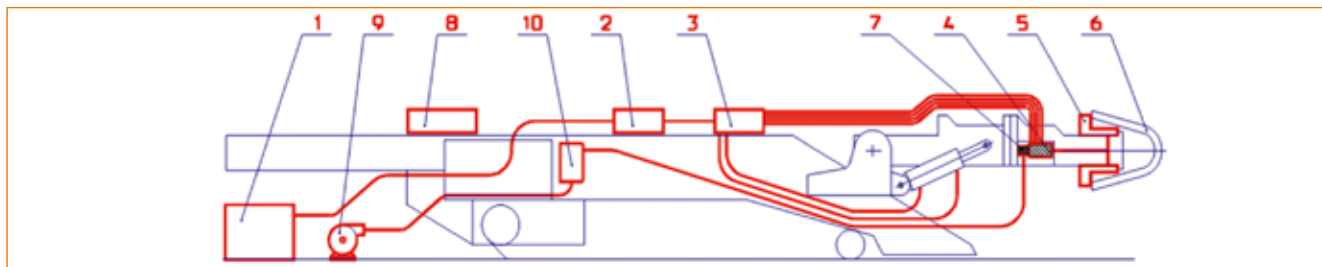
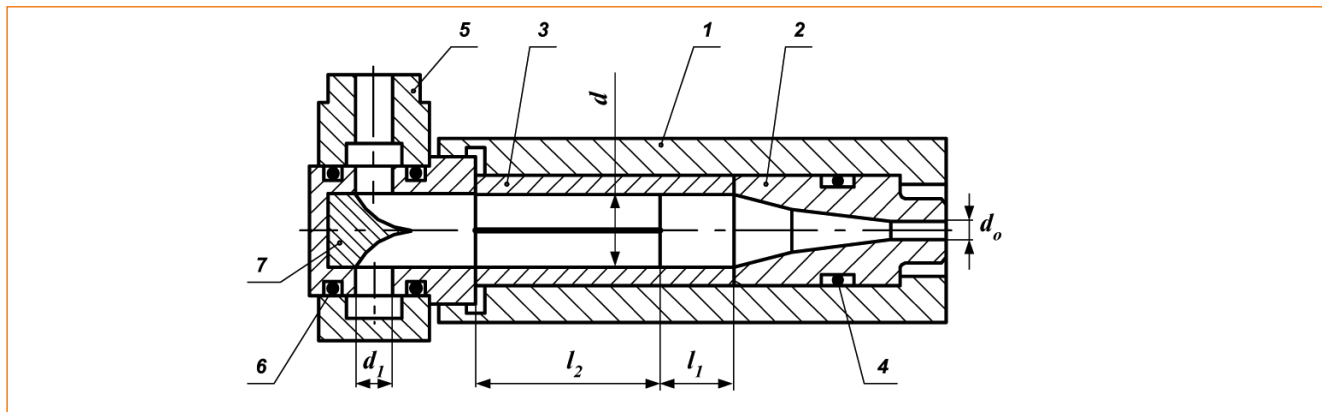


РИСУНОК 3 Струеформирующие устройства с радиальным подводом воды: 1 — корпус; 2 — насадка; 3 — успокоитель; 4 и 6 — уплотнения; 5 — цапфа; 7 — направляющий конус; d — диаметр канала МСУ; d_0 — диаметр насадки; d_1 — щели; l_1 — расстояние от успокоителя до насадки; l_2 — длина успокоителя

FIGURE 3 Jetting devices with radial water supply: 1 — body; 2 — nozzle; 3 — stiller; 4 and 6 — seals; 5 — trunnion, 7 — guide cone; d — jetting devices diameter; d_0 — nozzle diameter; d_1 — slots; l_1 — distance from stiller to nozzle; l_2 — stiller length



менных технологий пылевзрывозащиты за рубежом (в Германии, Англии, США и других странах) позволяют сделать вывод, что значительно более высокой эффективностью и надежностью по сравнению с традиционными схемами низконапорного орошения обладают внутренние системы высоконапорного орошения с подачей на след резцов водяных струй с давлением 10–20 МПа. Вместо форсунок, в которых распыление жидкости достигается благодаря искусственной турбулизации, в системах высоконапорного орошения используются разработанные нами специальные струеформирующие устройства (насадки), обеспечивающие распыление струи посредством естественных процессов, вызванных повышением давления и увеличением скорости истечения (рис. 3). При этом достигается более интенсивное эжектирование воздуха и тем самым активизируется удале-

ние метана из зоны резания. Повышение скорости водяного потока способствует более эффективному связыванию тонких фракций взрывоопасной пыли, увеличению уноса тепла и, следовательно, лучшему охлаждению режущего инструмента и его раскаленного следа в горной породе.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что струя воды в состоянии эффективно охладить раскаленные частицы породы под вершиной резца, не допустить возникновения искр и тем самым устранить опасность взрыва метана. При этом доля пыли, способной проникнуть в легкие, уменьшается на 83,9%, а крупной пыли — на 92,1%.

Перспективной представляется разработанная в Институте горного дела имени А.А. Скочинского совместно с Тульским государственным университетом система высоконапорного орошения, предназна-



ченная для модернизации проходческих комбайнов с целью повышения эффективности подавления искрообразования в зоне контакта резца с породой и улучшения пылеподавления [4]. Она содержит комплект навесного оборудования, достаточный для монтажа и отладки на полностью собранной машине, в том числе и в условиях рудоремонтного завода (рис. 4). Преобразователь обеспечивает повышение давления с 0,6–2,0 МПа на входе до 15–20 МПа на выходе и расход высоконапорной воды 50–75 л/мин.

Заключение

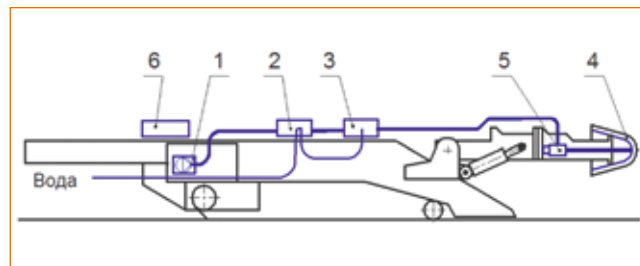
Таким образом, отсутствие контакта режущего инструмента (струи воды) с разрушаемым массивом, возможность снижения металлоемкости забойного оборудования при одновременном увеличении его энерговооруженности благодаря дистанционному расположению энергетического оборудования, исключение воспламенения пылеметановоздушной смеси от искр трения в зоне контакта разрушающего инструмента с породой, уменьшение запыленности рудничной атмосферы до предельно допустимых концентраций являются основными преимуществами гидроструйных технологий в горном производстве.

Литература/References

1. Мерзляков В.Г., Бафталовский В.Е. Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве. М.: Издательство ННЦПП — ИГД им. А.А. Скочинского, 2004. 645 с. [Merzlyakov V.G., Baftalovsky V.E. Physical and technical bases of water jet technologies in mining. M.: NNCGP — A.A. Skochinsky IGD. 2004: 645 p. (In Russ.).]
2. Мерзляков В.Г., Бафталовский В.Е., Байдинов В.Н. Механизация горных работ с использованием гидротехнологий. Горное оборудование и электромеханика. 2010; 6: 2–6. [Merzlyakov V.G., Baftalovsky V.E., Baidinov V.N. Mechanization of mining operations using hydraulic technologies. Mining Equipment and Electromechanics. 2010; 6: 2–6. (In Russ.).]
3. Мерзляков В.Г., Бафталовский В.Е., Иванушкин И.В. Использование гидроструйных технологий для обеспечения эффективного пылеподавления и пылевзрывозащиты при очистных, подготовительных и вспомогательных работах. Уголь. 2002; 10. [Merzlyakov V.G., Baftalovsky V.E., Ivanushkin I.V. Use of water jet technologies to ensure effective dust suppression and dust explosion protection in mining, preparatory and auxiliary operations. Ugol. 2002; 10. (In Russ.).]
4. Мерзляков В.Г., Деревяшкин И.В. Создание средств пылевзрывозащиты для исполнительных органов выемочных и проходческих машин на угольных шахтах. Машиностроение, горное оборудование и электромеханика. 2016; 7. [Merzlyakov V.G., Derevyashkin I.V. Creation of dust and explosion protection for the mining and tunneling machines at the coal mines. Mechanical Engineering, Mining Equipment and Electromechanics. 2016; 7. (In Russ.).]

РИСУНОК 4 Схема компоновки системы высоконапорного орошения на проходческом комбайне: 1 — блок насосный; 2 — гидрпанель; 3 — преобразователь давления; 4 — режцовая коронка; 5 — водосъемник; 6 — электрооборудование

FIGURE 4 Layout of the high-pressure irrigation system on the tunnelling machine: 1 — pumping unit; 2 — hydraulic panel; 3 — pressure transducer; 4 — cutting head; 5 — water pick; 6 — electrical equipment



Примечание/Note. Вода — Water.

Вклад авторов. В.Г. Мерзляков, И.В. Деревяшкин: разработка дизайна исследования, изучение данных для анализа, обзор публикаций по теме статьи, статистический анализ полученных данных, написание текста рукописи.

Authors contributions. V.G. Merzlyakov, I.V. Derevyashkin: development of research design, obtaining data for analysis, review of publications on the topic of the article, statistical analysis of the data obtained, paper writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила: 17.12.2021. **Принята к публикации:** 14.01.2022. **Article received:** 17.12.2021. **Accepted for publication:** 14.01.2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мерзляков Виктор Георгиевич, профессор, д.т.н., профессор кафедры техники и технологии горного и нефтегазового производства, Московский политехнический университет*. Генеральный директор ООО «МОГОРМАШ». ORCID: 0000-0002-0647-259X.

Деревяшкин Игорь Владимирович, профессор, д.т.н., профессор кафедры техники и технологии горного и нефтегазового

производства, Московский политехнический университет*. Профессор кафедры горного дела, филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Лубкин. ORCID: 0000-0002-1520-34550.

* Адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38. Телефон: +7 (495) 223-05-23. E-mail: mospolytech@mospolytech.ru.

AUTHORS INFORMATION

Merzlyakov Viktor Georgievich, Professor, DScTech, Professor of the Department of Mining Engineering and Technology, Moscow Polytechnic University*. General Director of MOGORMASH LLC. ORCID: 0000-0002-1111-34550.

Derevyashkin Igor Vladimirovich, Professor, DScTech, Professor of the Department of Mining Engineering and Technology, Moscow Polytechnic University*. Professor of the Department of Mining Engineering, Gubkin branch of National Research Technological University «MISiS». ORCID: 0000-0002-1520-34550.

* Address: 38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, 107023. Phone: +7 (495) 223-05-23. E-mail: mospolytech@mospolytech.ru.

УДК 539.16
 UDC 539.16

Радиационная опасность и чрезвычайные ситуации на объектах атомной промышленности России



Radiation Hazards and Emergencies at Nuclear Power Facilities in Russia

АВТОРЫ

AUTHORS

**В.В. Спиридонова¹,
В.П. Спиридонов²**, к. т. н., профессор

**V.V. Spiridonova¹,
V.P. Spiridonov²**

¹ ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт», г. Москва, Россия
² Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Россия

¹ Federal State Budgetary Institution All-Russian Research Geological Oil Institute, Moscow, Russia
² Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

РЕЗЮМЕ

SUMMARY

Потенциально опасными объектами энергетики считаются атомные электростанции (АЭС). Неблагоприятная радиационная обстановка в России сложилась в процессе эксплуатации, а также из-за разных испытаний и аварий. Правильное определение стратегии действий, распределение сил и средств способствуют предотвращению рисков чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Potentially dangerous energy facilities are nuclear power plants (NPP). The unfavorable radiation situation on the territory of the Russian Federation has developed during operation, various kinds of tests, accidents. The correct definition of the strategy of actions, the distribution of forces and means helps to prevent the risks of accidents and emergencies.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

KEYWORDS

РАДИОАКТИВНОСТЬ, ОПАСНОСТЬ И РИСК ЧС, АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

RADIOACTIVITY, DANGER AND RISK OF EMERGENCIES, NUCLEAR POWER PLANTS

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

FOR CITATION

Спиридонова В.В., Спиридонов В.П. Радиационная опасность и чрезвычайные ситуации на объектах атомной промышленности России. Технический оппонент. 2022; 1 (8): 28–33.

Spiridonova V.V., Spiridonov V.P. Radiation hazards and emergencies at nuclear power facilities in Russia. *Technicheskiy opponent = Technical Opponent*. 2022; 1 (8): 28–33.

Введение

При самопроизвольном радиоактивном распаде ядер появляется опасное для здоровья людей ионизирующее излучение того или иного характера (в зависимости от типа распада). Среди естественных радионуклидов наибольший вклад (более 50%) в суммарную дозу облучения принадлежит радону и дочерним продуктам его распада.

Радиоактивность (радиоактивный распад ядер) представляет собой явление, которое свойственно отдельным нестабильным (радиоактивным) ядрам, способным возникать при ядерных реакциях или имеющим природное происхождение.

Радиационную опасность и риск ЧС вызывают появление источника радиации в местах нахождения или возможного пребывания людей и радиационная либо ядерная авария (которая влечет за собой

радиационную) на радиационно опасном объекте. При этом происходит неконтролируемый выброс за его пределы (в биосферу) радиоактивных веществ или ядерных материалов. В то же время радиационно опасный объект может находиться на земле или под ней, на поверхности воды или под ней, а также в воздушном или космическом пространстве. Такая авария представляет большую опасность, так как вызывает радиоактивное загрязнение биосферы (в том числе и области жизнедеятельности людей). Очистка последней от радиоактивных веществ или ядерных материалов (деактивация) — это, как правило, трудная задача, а иногда и просто невозможная. Радиационная авария может перерасти в химическую. Например, при выбросе в биосферу токсичного плутония. Применение в России ядерного оружия (или его детонация) — это тоже, по сути, радиационная авария. Как и вынос (при

определенных обстоятельствах) за пределы радиационно опасного объекта радиоактивных веществ или ядерных материалов вследствие халатности или воровства персонала или по злему умыслу (террористический акт) [1, 2].

В Российской Федерации повышенная естественная концентрация радона наблюдается на территории Северо-Западного (Мурманская и Ленинградская области), Северо-Кавказского (республики Северного Кавказа), Дальневосточного (Амурская область, север Хабаровского края, Чукотский автономный округ) и Сибирского федеральных округов. Наибольшее техногенное радиационное загрязнение в России отмечается в отдельных районах Челябинской, Курганской и Свердловской областей (в результате аварий на производственном объединении «Маяк») и в Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областях (из-за чернобыльской катастрофы). Неблагоприятная радиационная обстановка фиксируется и на архипелаге Новая Земля. В зоне радиоактивного загрязнения находятся акватории Баренцева и Карского морей, есть такие источники в Охотском и Японском морях. В случае радиационных аварий только на атомных электростанциях страны в потенциально опасных зонах может находиться около 21 тысячи работников [3, 4, 5].

Предупреждение ЧС на радиационных объектах

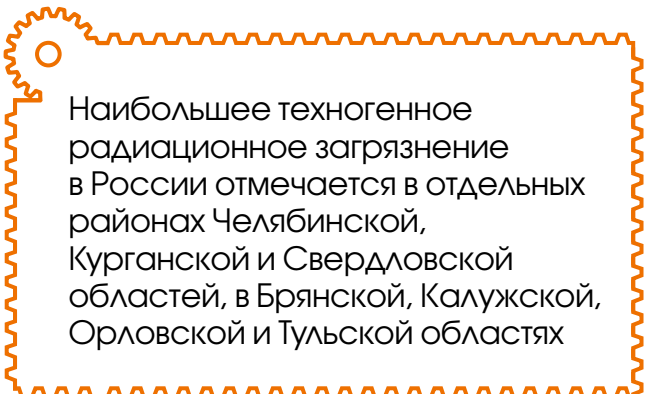
На объектах атомной промышленности России своевременно проводятся утилизация и переработка ядерных отходов. Радиационная ситуация на предприятиях Росатома контролируется автоматизированной системой контроля радиационной обстановки (АСКРО). Это позволяет осуществлять непрерывный надзор на санитарно-защитной территории и в зоне наблюдения атомных объектов. Данные измерений публикуются на сайте Росатома в течение двух часов после их получения Ситуационно-кризисным центром Росатома, являющимся оператором отраслевой АСКРО госкорпорации.

К основным факторам, которые формируют радиационную обстановку, относятся природная (естественная) радиоактивность и загрязнения территорий и водных объектов техногенными радионуклидами. Естественный радиационный фон можно определить космическим излучением и наличием естественных радионуклидов, содержащихся в горных породах и почве. Среди естественных радионуклидов наибольший вклад (более 50%) в суммарную дозу облучения вносит радон и дочерние продукты его распада. Опасность этого газа заключается в его широком распространении, высокой проникающей способности и миграционной подвижности.

Для организаций, эксплуатирующих особо радиационно опасные и ядерно опасные производства и объекты, потенциально опасными становятся атомные электростанции (АЭС) с энергетическими реакторами различных типов, предприятия, использующие промышленные реакторы, радиохими-

ческие заводы, перерабатывающие отработавшее ядерное топливо, опытные и исследовательские реакторы большой мощности, хранилища отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), высоко- и среднеактивных отходов. В России находится значительное количество радиационно опасных объектов. Это 10 АЭС, 76 исследовательских ядерных установок, промышленные предприятия ядерно-топливного цикла, пункты хранения ядерных материалов, отработавшего ядерного топлива и других радиоактивных отходов (табл. 1). Все они являются потенциально опасными: аварии на них могут привести к радиоактивному загрязнению биосферы. Подавляющее большинство указанных объектов находится в ведении госкорпорации «Росатом», объединяющей через ОАО «Атомэнергопром» 89 предприятий, которые работают во всех сегментах атомной энергетики и ядерного топливного цикла.

Важная задача при обеспечении экологической безопасности ядерных технологий — решение проблемы радиоактивных отходов (РАО) [6, 7, 8]. На объектах атомной промышленности страны накоплено около 480 миллионов кубических метров жидких и 78 миллионов тонн твердых РАО, а также 19 тысяч тонн отработавшего ядерного топлива. Радиоактивные отходы есть в 142 организациях,



Наибольшее техногенное радиационное загрязнение в России отмечается в отдельных районах Челябинской, Курганской и Свердловской областей, в Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областях

расположенных в 47 субъектах Российской Федерации, и находятся более чем в 1 000 хранилищ различного типа. Ежегодное возникновение жидких РАО — около 4 миллионов кубических метров, твердых — более 1 миллиона тонн, ОЯТ — приблизительно 650 тонн. Темпы переработки радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива отстают от скорости их образования. Окончательной изоляции в глубоких геологических формациях подвергается только около 20% образующихся жидких РАО.

Вывод из эксплуатации радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РИТЭГ) в России является одним из приоритетных направлений деятельности по снижению потенциальной радиационной опасности, связанной с источниками ионизирующего излучения в стране. Сегодня в Российской Федерации на балансе организаций Минобороны России, Росморречфлота, Минтранса, Росгидромета, госкорпорации «Росатом» насчитывается 697 РИТЭГов. В том числе размещено на временное хра-

ТАБЛИЦА 1 Местоположение и тип установок на АЭС

TABLE 1 Location and type of installations at nuclear power plants

Федеральный округ Federal Districts	Субъект Constituent entity	Наименование объекта Name of facility	Суммарная мощность, МВт, и тип ЯЭУ Total capacity, MW, and type of NPP
Центральный Central Federal District	Тверская область Tver region	Калининская АЭС Kalinin NPP	3 000, ВВЭР-1 000 3 000, VVER-1,000
Центральный Central Federal District	Курская область Kursk region	Курская АЭС Kursk NPP	4 000, РБМК-1 000 4 000, LWGR-1,000
Центральный Central Federal District	Воронежская область Voronezh region	Нововоронежская АЭС Novovoronezh NPP	1 834, ВВЭР-440, ВВЭР-1 000 1 834, VVER-440, VVER-1,000
Центральный Central Federal District	Смоленская область Smolensk region	Смоленская АЭС Smolensk NPP	3 000, РБМК-1 000 3 000, LWGR-1,000
Северо-Западный Northwestern Federal District	Ленинградская область Leningrad region	Ленинградская АЭС Leningrad NPP	4 000, РБМК-1 000 4 000, LWGR-1,000
Северо-Западный Northwestern Federal District	Мурманская область Murmansk region	Кольская АЭС Kola NPP	1 760, ВВЭР-440 1 760, VVER-440
Приволжский Volga Federal District	Саратовская область Saratov region	Балаковская АЭС Balakovo NPP	4 000, ВВЭР-1 000 4 000, VVER-1,000
Уральский Ural Federal District	Свердловская область Sverdlovsk region	Белоярская АЭС Belayarsk NPP	600, БН-600 600, SFR-600
Южный Southern Federal District	Ростовская область Rostov region	Ростовская АЭС Rostov NPP	2 000, ВВЭР-1 000 2 000, VVER-1,000
Дальневосточный Far Eastern Federal District	Чукотский автономный округ Chukotka Autonomous Okrug	Билибинская АЭС Bilibino NPP	48, ЭГП-6 48, EGR-6

нение в организациях Росатома (ФГУП «ДальРАО» и ФГУП «РосРАО») 139 РИТЭГов. Находится в эксплуатации и в местах промежуточного хранения 558 РИТЭГов. Для снижения потенциальной радиационной опасности, связанной с РИТЭГами, в основном за счет финансовых средств США, Норвегии, Франции, Канады, предприятиями, находящимися в ведении госкорпорации «Росатом», оказываются услуги по транспортировке, временному/долговременному хранению и разборке РИТЭГов. Это ОАО «НИИТФА» (обследование, демонтаж и разборка РИТЭГов), ФГУП «ДальРАО» и ФГУП «РосРАО» (временное хранение), ФГУП «ПО «Маяк»», ОАО ВО «Изотоп», ОАО «Атомспецтранс» (перевозка). В 2001–2008 годах было утилизировано 336 РИТЭГов.

В настоящее время Росатом финансирует первоочередные меры по таким направлениям, как утилизация выработавших свой ресурс атомных

подводных лодок (АПЛ), плавучих технических баз атомного флота и судов атомно-технического обслуживания. Также ведутся работы по реабилитации территорий бывших военных береговых технических баз, нынешних береговых хранилищ отработавшего ядерного топлива АПЛ и других радиоактивных отходов. Подавляющее большинство вышеуказанных объектов находится в Северо-Западном (Кольский полуостров) и Дальневосточном федеральных округах.

В 2008 году на территории РФ, по данным Ростехнадзора, работали 2 206 поднадзорных организаций, предприятий и учреждений. Они осуществляли свою деятельность в области использования атомной энергии и имели в своем составе 6 397 территориально обособленных или технологически независимых радиационно опасных объектов, где проводятся работы с радиоактивными веществами и РАО (включая свежее и ОЯТ).

Обращение со свежим и отработавшим ядерным топливом, радиоактивными отходами в эксплуатирующих организациях в основном соответствует требованиям норм и правил в области использования атомной энергии. Транспортирование ядерных материалов в России осуществляется всеми видами транспорта — автомобильным, железнодорожным, водным (морским) и воздушным. Требования безопасности регламентируются федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов» (НП-053-04). Транспортирование ядерных материалов осуществляется в транспортных упаковочных комплектах. На них выдаются сертификаты, подтверждающие соответствие конструкции и условий перевозки требованиям вышеуказанных федеральных норм и правил.

При возникновении нарушения в работе на объектах использования атомной энергетики проводятся расследование и классификация данного происшествия по международной шкале ядерных событий (ИНЕС). События классифицируются по семи уровням. В верхних уровнях четырех они называются авариями, в нижних уровнях трех — инцидентами. События, не существенные с точки зрения безопасности, классифицируются ниже шкалы уровнем 0. Их называют отклонениями. События, не имеющие отношения к безопасности, не входят в шкалу. Для проведения анализа исходных событий указанных нарушений производится их распределение по непосредственным и коренным причинам. Это позволяет более правильно оценить состояние и степень надежности ядерно-энергетической установки, на которой случилось происшествие. Чрезвычайная ситуация вследствие возникновения радиационной аварии возможна, если последняя представляет опасность для жизнедеятельности населения, находящегося в районе ее протекания [9, 10].

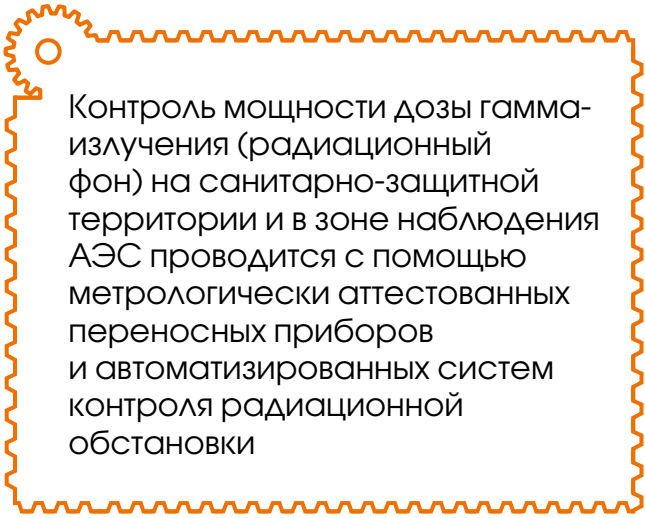
Изменения радиационной обстановки в результате аварий

Основными событиями, сильно изменившими радиационную обстановку в России, считаются аварии на производственном объединении «Маяк» (Челябинская область), произошедшие в 1957 и 1967 годах, и взрыв на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС (УССР) в 1986-м.

ПО «Маяк», расположенное на восточном берегу озера Иртяш, является одним из крупнейших предприятий ядерно-топливного цикла Росатома. Объединение работает более 60 лет, до 1990-х годов оно было ориентировано на производство оружейного плутония. Многолетняя деятельность ПО «Маяк» привела к накоплению огромного количества радионуклидов и сильному загрязнению Челябинской, Курганской и Свердловской областей.

Из-за сброса отходов радиохимического производства непосредственно в открытую речную систему Обского бассейна через реку Течу (1949–1951),

а также в результате аварий в 1957 и 1967 годах в окружающую среду было выброшено радионуклидов суммарной активностью 23 миллиона Ки. Радиоактивное загрязнение охватило территорию площадью 25 тысяч квадратных километров (население — более 500 тысяч человек). В 1957 году вследствие теплового взрыва емкости с радиоактивными отходами случился мощный выброс радионуклидов (церий-144, цирконий-95, стронций-90, цезий-137 и др.) с суммарной активностью 2 миллиона Ки. Сформировался Восточно-Уральский радиоактивный след длиной до 110 километров (в результате последующей миграции местами был до 400 километров) и шириной до 35–50 километров. Общая площадь загрязненной территории по стронцию-90 — 23 тысячи квадратных километров. Зона радиационного загрязнения на Южном Урале расширилась по причине ветрового разноса радиоактивных аэрозолей с пересохшей части технологического водоема



Контроль мощности дозы гамма-излучения (радиационный фон) на санитарно-защитной территории и в зоне наблюдения АЭС проводится с помощью метрологически аттестованных переносных приборов и автоматизированных систем контроля радиационной обстановки

№ 9 производственного объединения «Маяк» (озеро Карачай) в 1967 году. Под водоемом сформировалась линза загрязненных подземных вод объемом около 4 миллионов кубических метров и площадью 10 квадратных километров. Существует опасность проникновения таких вод в другие водоносные горизонты, а также выноса радионуклидов в речную сеть. В каскаде промышленных водоемов в верховьях Течи содержится 350 миллионов кубических метров загрязненной воды, которая является низкоактивными жидкими радиоактивными отходами (ЖРО). Сегодня сброс средне- и низкоактивных ЖРО в озеро Карачай продолжается. Следовательно, оно остается потенциальным источником радиоактивного загрязнения окружающей среды в случае уноса загрязненной воды под воздействием возможных смерчей. Образовавшаяся в районе этого озера линза подземных вод с загрязненными радионуклидами продвигается к реке Мишеляк.

По состоянию на 1 января 2008 года общая площадь территории вокруг ПО «Маяк», загрязненной радионуклидами, составляла 446,78 квадратного километра, из них 195,96 квадратного километра находится в зоне наблюдений. Уровни загрязнения

окружающей среды в радиусе 100 километров от производственного объединения в основном уменьшились, но по-прежнему остаются самыми высокими в Российской Федерации.

Вследствие взрыва и пожара на реакторе при аварии на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС (УССР) с 26 апреля по 10 мая 1986 года из разрушенного реактора было выброшено примерно 7,5 тонны ядерного топлива и продуктов деления с суммарной активностью около 50 миллионов Ки. Катастрофа вызвала выброс в атмосферу значительного количества главным образом летучих радиоактивных веществ.

Из-за того, что этот процесс происходил более 10 суток при меняющихся метеоусловиях, у территории основного загрязнения веерный, пятнистый характер. Кроме 30-километровой зоны, на которую пришлось большая часть выброса, в разных местах в радиусе до 250 километров были обнаружены участки, где уровень загрязненности составлял 200 Ки на квадратный километр. Общая площадь «пятен» с активностью более чем 40 Ки на квадратный километр достигла около 3,5 тысячи квадратных километров. На этом участке в момент аварии проживали 190 тысяч человек. Всего радиоактивным выбросом из-за катастрофы на Чернобыльской АЭС в разной степени было загрязнено 80% территории Белоруссии, вся северная часть Правобережной Украины и 19 областей РФ. В России наиболее сильное загрязнение фиксировалось в Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областях. Наибольшие площади загрязненных районов находятся на территории Брянской и Тульской областей. В этих местах после аварии выявляются повышенные значения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, которая уменьшается примерно в 4 раза за среднее время жизни цезия-137 на загрязненных территориях страны сократилось в 1,6 раза. Прогнозируется, что к 2056 году его уровень уменьшится в 5,12 раза с момента аварии. В зоне радиоактивного загрязнения (в соответствии с перечнем населенных пунктов, утвержденным распоряжением Правительства РСФСР от 28.12.1991 № 237-р) в 1991 году находилось 6 884 населенных пункта РФ. В них проживали 2,2 миллиона человек. По состоянию на 01.01.2006 в таких районах находилось 4 100 населенных пунктов. Там жили 1,6 миллиона человек, в том числе в зонах радиоактивного загрязнения Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей — около 1,2 миллиона. К 2056 году прогнозируется существенное сокращение количества населенных пунктов, отнесенных к районам радиоактивного загрязнения, до 984. Также предполагается, что число проживающих в них жителей уменьшится до 413,6 тысячи человек (соответственно в 4,2 и 3,8 раза по отношению к уровню 2006-го).

Заключение

Содержащая долгоживущие радионуклиды почва в европейской и азиатской частях России остается источником радиоактивного загрязнения

из-за вторичного ветрового подъема радиоактивной пыли с поверхности земли и пересохших водоемов. Источником вторичной радиоактивной загрязненности могут стать природные или техногенные пожары, которые порой происходят на загрязненных территориях.

Кроме того, в России неблагоприятная радиационная обстановка отмечается на полигонах и в прилегающих к ним районах, где длительное время проводились наземные и подземные ядерные испытания. Например, речь идет об архипелаге Новая Земля. Также в зоне радиоактивного загрязнения находятся акватории Баренцева и Карского морей. Сформировался радиоактивный след и Семипалатинского полигона (Казахстан). Помимо этого, фиксируются источники загрязнения в акваториях Охотского и Японского морей, где производились захоронения твердых и жидких радиоактивных отходов.

В 2009 году радиационная обстановка в Российской Федерации была в пределах радиационного фона. При этом уровни содержания техногенных радионуклидов в окружающей среде не представляли опасности для населения. В пределах зон радиоактивного загрязнения из-за аварий на Чернобыльской АЭС и ПО «Маяк», а также в районах расположения потенциально опасных в радиационном отношении объектов радиационная обстановка не изменилась. Семь локальных техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС), которые произошли в 2009 году на территории РФ и были вызваны происшествиями с выбросом (его угрозой) радиоактивных веществ, обусловлены обнаружением источников ионизирующего излучения в Москве. Это три ЧС при доставке мусора на мусоросжигающий завод, происшествия в г. Шелехове Иркутской области (на складе металлолома ОАО «РУСАЛ-ИркАЗ»), на железнодорожной станции Илецк-1 в г. Соль-Илецке Оренбургской области, в Новосибирске и в Грозном.

Контроль мощности дозы гамма-излучения (радиационный фон) на санитарно-защитной территории и в зоне наблюдения АЭС проводится с помощью метрологически аттестованных переносных приборов и автоматизированных систем контроля радиационной обстановки (ЕГАСКРО). Основное назначение АСКРО — непрерывный надзор на постах контроля. Последние расположены на санитарно-защитной территории и в зоне наблюдения АЭС. Также посредством АСКРО информационно осуществляется аналитическая поддержка противоаварийных структур, руководства АЭС, органов управления и государственной власти различных уровней в случае аварии на АЭС. Данные измерений публикуются на сайте Росатома в течение двух часов после их получения Ситуационно-кризисным центром госкорпорации, являющимся оператором отраслевой АСКРО Росатома.

Так как подавляющее большинство радиоактивно загрязненных и потенциально опасных объектов Российской Федерации имеет ведомственную принадлежность (в основном находятся в ведомстве госкорпорации «Росатом» и Министерства обороны), роль МЧС в плане снижения риска радиационных аварий является весьма ограничен-

ной. В основном она сводится к предотвращению и ликвидации различного вида пожаров и паводков, которые могут вызвать вторичное радиоактивное загрязнение.

При стабильной ситуации задача МЧС может состоять в правильном формировании стратегии

действий сил и средств министерства (в том числе с точки зрения материально-технического обеспечения) в случае возникновения серьезной радиационной аварии и в организации мероприятий, способствующих предотвращению таких чрезвычайных происшествий.

Литература/References

1. Указ Президента РФ от 13.05.2019 № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации». [Decree of the President of the Russian Federation № 216 dated 13.05.2019 «On the approval of the Energy Security Doctrine of the Russian Federation». (In Russ.)].
2. Азаров В.Н., Грачев В.А., Спиридонов В.П. и др. Безопасность жизнедеятельности. В кн.: Гутенев В.В., ред. Учебник для вузов Минобрнауки РФ. Волгоград: ПринТерра, 2009. 512 с. [Azarov V.N., Grachev V.A., Spiridonov V.P. et al. Life safety. In: Gutenev V.V., ed. Textbook for universities of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Volgograd: PrinTerra, 2009. 512 p. (In Russ.)].
3. Разумов В.В., Спиридонов В.П. и др. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Российской Федерации. В кн.: Шойгу С.К., ред. М.: Дизайн. Информация. Картография, 2010. 696 с. [Razumov V.V., Spiridonov V.P. et al. Atlas of Natural and Man-made hazards and emergency risks of the Russian Federation. In: Shoigu S.K., ed. Moscow: Design. Information. Cartography, 2010. 696 p. (In Russ.)].
4. Спиридонов В.П. Экологическая информационно-картографическая оценка опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций на территориях федеральных округов Российской Федерации и объектах топливно-энергетического комплекса. Проблемы региональной экологии. 2011; 4: 284–290. [Spiridonov V.P. Ecological information and cartographic assessment of hazards and risks of emergency situations in the territories of federal districts of the Russian Federation and objects of the fuel and energy complex. Problems of Regional Ecology. 2011; 4: 284–290. (In Russ.)].
5. Мировая энергетика — 2050. М.: Энергия, 2011. 360 с. [World Energy 2050. Moscow: Energy, 2011. 360 p. (In Russ.)].
6. Попков Е.Н., Беляев А.Н., Зверев С.Г. Современные научные направления Высшей школы электроэнергетических систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в области электроэнергетики. Технический оппонент. 2019; 4 (5): 12–16. [Popkov E.N., Belyaev A.N., Zverev S.G. Modern scientific directions of the Higher School of Electric Power Systems of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University in power engineering. Tekhnicheskiy opponant = Technical Opponent. 2019; 4 (5):12–16 (In Russ.)].
7. Федорович Е.Д., Калютик А.А., Конюшин М.В., Соколова Е.А. Перспективы развития отечественных технологий ядерного опреснения. Технический оппонент. 2019; 4 (5): 17–22. [Fedorovich E.D., Kalyutik A.A., Konyushin M.V., Sokolova E.A. Prospects of Russian technologies development in the sphere of nuclear desalination. Tekhnicheskiy opponant = Technical Opponent. 2019; 4 (5): 17–22. (In Russ.)].
8. Елистратов В.В. Современное состояние и тренды арктической энергетики. Технический оппонент. 2019; 2 (3): 13–21. Elistratov V.V. State of the art and trends in arctic power systems. Tekhnicheskiy opponant = Technical opponant. 2019; 2 (3): 13–21. (In Russ.)].
9. Кузнецов В.М., Острецов И.Н., Хвостова М.С., Шингаркин М.А. Современное состояние безопасности атомных электростанций, перспективы развития атомной энергетики и концептуальные вопросы стратегии развития экологически чистой ядерной энергетики. Безопасность в техносфере. 2014; 3 (48): 60–73. [Kuznetsov V.M., Ostretsov I.N., Khvostova M.S., Shingarkin M.A. The current state of safety of nuclear power plants, prospects for the development of nuclear energy and conceptual issues of the strategy for the development of environmentally friendly nuclear energy. Safety in the Technosphere. 2014; 3 (48), 2014: 60–73. (In Russ.)].
10. АЭС «Аккую». Энергоблоки 1, 2, 3, 4. Определение категорий помещений по взрывопожарной и пожарной опасности и классов взрывоопасной (пожароопасной) зоны в здании 00UKS. Инженерный расчет 00UKS-MED 0002. 2016. [Akkuyu NPP. Power units 1, 2, 3, 4. Determination of categories of premises for explosion and fire hazard and classes of explosive (fire-hazardous) zone in the building 00UKS. Engineering calculation 00UKS-MED 0002. 2016. (In Russ.)].

Вклад авторов. В.В. Спиридонова, В.П. Спиридонов: разработка дизайна исследования, получение данных для анализа, обзор публикаций по теме статьи, статистический анализ полученных данных, написание текста рукописи.

Authors contributions. V.V. Spiridonova, V.P. Spiridonov: developing of research design, obtaining data for analysis, reviewing publications on the topic of the article, statistical analysis of the obtained data, article writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declares no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Financing. The study was performed without external funding.

Статья поступила: 15.12.2021. **Принята к публикации:** 17.01.2022. **Article received:** 15.12.2021. **Accepted for publication:** 17.01.2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Спиридонова Валентина Валерьевна, научный сотрудник отдела ГИС и цифровой картографии отделения геоинформатики ВНИИГеосистем ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт». Адрес: 117105, г. Москва,

Варшавское шоссе, д. 8. Телефон: +7 (495) 954-53-50. E-mail: geosys@geosys.ru. ORCID: 0000-0001-5328-9563.

Спиридонов Валерий Петрович, к. т. н., профессор кафедры инженерной теплофизики и гидравлики Академии государственной противопожарной службы МЧС России. Адрес: 129301, г. Москва, ул. Б. Галушкина, д. 4, стр. 2. Телефон: +7 (495) 617-27-27. E-mail: info@academygpps.ru. ORCID: 000-0002-8794-8384.

AUTHORS INFORMATION

Spiridonova Valentina Valeryevna, Researcher at the geographic information systems and digital cartography department of VNIIGeosystems geoinformatics department, All-Russian Research Geological Petroleum Institute. Address: 8, Varshavskoe Shosse, Moscow, 117105. Phone: +7 (495) 954-53-50. E-mail: geosys@geosys.ru. ORCID: 0000-0001-5328-9563.

Spiridonov Valery Petrovich, PhD in Technology, Professor, Department of Engineering Thermophysics and Hydraulics, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Address: 4 B. Galushkin St., bld. 2, Moscow, 129301. Phone: +7 (495) 617-27-27. E-mail: info@academygpps.ru. ORCID: 000-0002-8794-8384.

УДК 681.5
UDC 681.5

Техническое решение адаптивной системы управления сушильным барабаном на обогатительной фабрике «Лебединский ГОК»



Technical Solution of Adaptive Control System for Drying Drum in Ore-processing Plant JSC Lebedinsky GOK

АВТОРЫ

AUTHORS

И.В. Деревяшкин^{1,3}, д.т.н., профессор,
М.Е. Тараненко^{1,2}, к.т.н.,
А.А. Казанцев¹, к.т.н., доцент

¹ Филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Губкин, Россия

² АО «Лебединский ГОК», г. Губкин, Россия

³ Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

I.V. Derevyashkin^{1,3},
M.E. Taranenko^{1,2}, **A.A. Kazantsev¹**

¹ National University of Science and Technology «MISiS», Gubkin, Russia

² JSC Lebedinsky GOK, Gubkin, Russia

³ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

РЕЗЮМЕ

SUMMARY

Одно из важнейших переделов АО «Лебединский ГОК», обогатительной фабрики, — комплекс сушки концентрата цеха № 4. Вопрос максимизации производительности и минимизации расхода топлива (природного газа) имеет большое экономическое и практическое значение.

Основная идея работы заключается в создании адаптивной автоматизированной системы оптимизации процесса горения топлива сушильного барабана. Для этого применяется метод оценки состава продуктов горения в отходящих газах.

Предложено техническое решение, позволяющее оптимизировать расход топлива при максимальной производительности барабанов комплекса сушки концентрата обогатительной фабрики «Лебединский ГОК».

One of the most important redistributions at ore-processing plant JSC Lebedinsky GOK is a concentrate drying complex. The issue of optimizing the thermal modes of drying drums, in particular maximizing productivity and minimizing fuel consumption (natural gas), have a significant economic and practical value.

Basic idea of the paper is a creation an adaptive automated system for optimizing the combustion process of the fuel of a drying drum, using the method for evaluating the composition of combustion products in exhaust gases.

A technical solution has been proposed that allows to optimize the gas consumption at the maximum productivity of the drying drums of the concentrate drying complex of the ore-concentration plant of JSC Lebedinsky GOK.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

KEYWORDS

РЕГУЛИРОВАНИЕ, СУШИЛЬНЫЙ БАРАБАН, ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ, АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

ADJUSTMENT, DRYING DRUM, OPTIMIZATION OF THE COMBUSTION PROCESS, ADAPTIVE CONTROL SYSTEM

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

FOR CITATION

Деревяшкин И.В., Тараненко М.Е., Казанцев А.А. Техническое решение адаптивной системы управления сушильным барабаном на обогатительной фабрике «Лебединский ГОК». Технический оппонент. 2022; 1 (8): 34–40.

Derevyashkin I.V., Taranenko M.E., Kazantsev A.A. Technical solution of adaptive control system for drying drum in ore-processing plant JSC Lebedinsky GOK. *Technicheskii opponent* = *Technical Opponent*. 2022; 1 (8): 34–40.

Введение

Основной объем вредных выбросов техногенного характера в атмосферу составляют продукты сжигания топлива на предприятиях энергетики, ЖКХ, промышленного и горного производства [1–6],

в том числе на таких гигантах, как АО «Лебединский ГОК». В то же время производственные технологии постоянно модернизируются. Ужесточаются и требования к схемам оптимизации затрат на использование энергии органического топлива [7, 8, 9], поэтому разработка адаптивной системы управления

сушильным барабаном для АО «Лебединский ГОК» считается актуальной [10].

Технология сушки концентрата

В цехе № 4 осуществляются:

- изготовление железорудного концентрата с массовой долей железа более 69,5% (участок дообогащения, подготовки концентрата для цеха ГБЖ);
- производство сушеного концентрата (соответствующий участок);
- складирование и отгрузка железорудных концентратов на ФОК и в вагоны РЖД (участок отгрузки и производства высококачественного концентрата).

На участке по производству сушеного концентрата для его обезвоживания до 3% влажности используется технология сушки. Это процесс, основанный на испарении влаги в окружающую среду при нагревании. Он включает в себя стадии сушки влажного продукта в барабанной конвективной сушилке и очистки отходящих газов.

Сушка производится непрерывным прямоточком топочными газами во вращающемся барабане, установленном с наклоном 3° в сторону разгрузки. Передача тепла от теплоносителя к материалу осуществляется с помощью конвекции, излучения от стен барабана и теплопроводности при непосредственном контакте частиц концентрата со стенками устройства.

Преобладающим процессом в барабанной сушилке является конвективный теплообмен. Во время движения материала происходит испарение влаги из его частиц. В последней секции сушилки потоки концентрата и теплоносителя разделяются посредством секторной насадки и выводятся в камеру выгрузки.

Сушеный концентрат попадает в нижнюю часть камеры, затем — на конвейер. Далее сушильный агент поднимается вверх, увлекая за собой часть мелких пылевидных частиц. Затем он поступает в систему газоочистки.

В качестве теплоносителя (сушильного агента) выступает природный газ, который разбавлен воздухом до заданной температуры. Для сжигания топлива в топочную камеру посредством одного вентилятора нагнетается воздух. С помощью другого вентилятора подается воздух для разбавления продуктов горения. Полученная смесь идет прямоточком с высушиваемым материалом по барабанной сушилке, насыщается парами воды и направляется в систему газоочистки.

Технология включает следующие технологические операции:

- обезвоживания железорудного концентрата в сушильном барабане;
- очистку отходящих газов.

Концентрат железорудный с крупностью 0,034 мм (77–85%) и исходным содержанием влаги 10,2% подается в загрузочное устройство сушильного барабана. Обезвоживание этого сырья производится постоянно прямым потоком смешанных горючих газов. Процесс происходит в соответствии с технологическим регламентом сушильного барабана. При

сушке концентрата должна поддерживаться температура отходящего потока смешанных горючих газов в автоматическом режиме.

Сухое сырье с содержанием влаги не более 3,0 (+0,5) % и температурой не более 85 °С выгружается из устройства разгрузки сушильного барабана.

Отходящие газы с температурой в пределах 100–150 °С и с содержанием пыли до 26,85 г/м³ подаются на двухстадийную систему очистки. Первая стадия — оборудование циклонного типа, вторая — такое устройство, как скруббер Вентури. Уловленная после первого этапа пыль возвращается в готовый продукт.

Пылегазоочистка обеспечивает требуемую (заданную) концентрацию мелкодисперсной пыли в газах после очистки, которая выбрасывается в атмосферу с концентрацией не более 49 мг/м³.

Технологическая схема сушильного барабана № 1 УППСК цеха № 4 обогатительной фабрики представлена на **рис. 1**, технические характеристики процесса сушки концентрата приведены в **табл. 1**.

Для безаварийной работы комплекса сушки должны постоянно производиться автоматический контроль и управление технологическим процессом обезвоживания концентрата [11].

Требования к подготовке и запуску топки в работу: необходимо убедиться в готовности горелочного устройства и дымососа, т. е. проверить наличие давления газа и воздуха на горение и разрежения.

При достижении в топке температуры 800–850 °С производится подача материала. Разрежение может сильно меняться. Это происходит из-за неравномерной подачи материала в загрузочное устройство. Технологический персонал должен контролировать температуру, следить за давлением газа, воздуха и разрежением в топке.

При работе установки в режиме плановой производительности факелу нужно полностью заполнить топочную камеру и иметь ярко-соломенный цвет. При недостатке воздуха пламя удлиняется и становится темно-красного (желтого) оттенка. При избытке воздуха оно делается короче и приобретает бело-голубой цвет.

Запуск и останов топки производится путем подачи (и прекращения) газа на горелку благодаря включению/выключению быстродействующих электромагнитных клапанов.

Система очистки отходящих газов

На первой ступени газоочистки отходящие газы под действием разрежения дымососа подаются на батарею гидроциклонов Ц1 и Ц2, работа которых основана на использовании центробежных сил, возникающих при вращении потока отходящих газов внутри корпуса агрегата. Вращение достигается путем углового ввода потока. В результате действия центробежных сил частицы пыли выпадают из потока. В циклоне Ц1 отвод уловленных частиц осуществляется через двойной клапан — мигалку. После этого материал выгружается на конвейер

КСК1 готового продукта. Из циклона Ц2 частицы отводятся в дренажную канаву, а далее — с помощью насосов — в ЦО1.

Очищенный поток из циклонов Ц1, Ц2 поступает на вторую ступень газоочистки — скруббер Вентури СВ. Это устройство состоит из трубы Вентури и сборника-каплеуловителя. В трубе осуществляется процесс дробления орошающей жидкости движущимся с большой скоростью пылегазовым потоком. В качестве орошающей жидкости используется вода, подаваемая насосами Н1 и Н2 из сборника-каплеуловителя. Для поддержания уровня жидкости к сборнику-каплеуловителю постоянно подводится вода. Избыток жидкости в виде перелива выходит в гидрозатвор. Дымосос поддерживает разрежение в сушильном барабане и обеспечивает технологический процесс горения горелки и движение горячих газов и испаряемой влаги к разгрузочному устройству барабана.

Очищенный от твердых частиц воздух в скруббере Вентури выходит в атмосферу. Твердые части-

цы возвращаются в технологический процесс цеха обогащения № 1 фабрики.

Сушка сырья включает две стадии: собственно сушку влажного продукта в барабанной конвективной сушилке и очистку отходящих газов.

Железорудный концентрат крупностью 0,045 мм (88–96%) и начальной влажностью до 10,2% поступает в загрузочную камеру сушилки. Просушенный материал с влажностью не более 3,0 (+0,5) % и температурой не более 90 °С разгружается из камеры выгрузки.

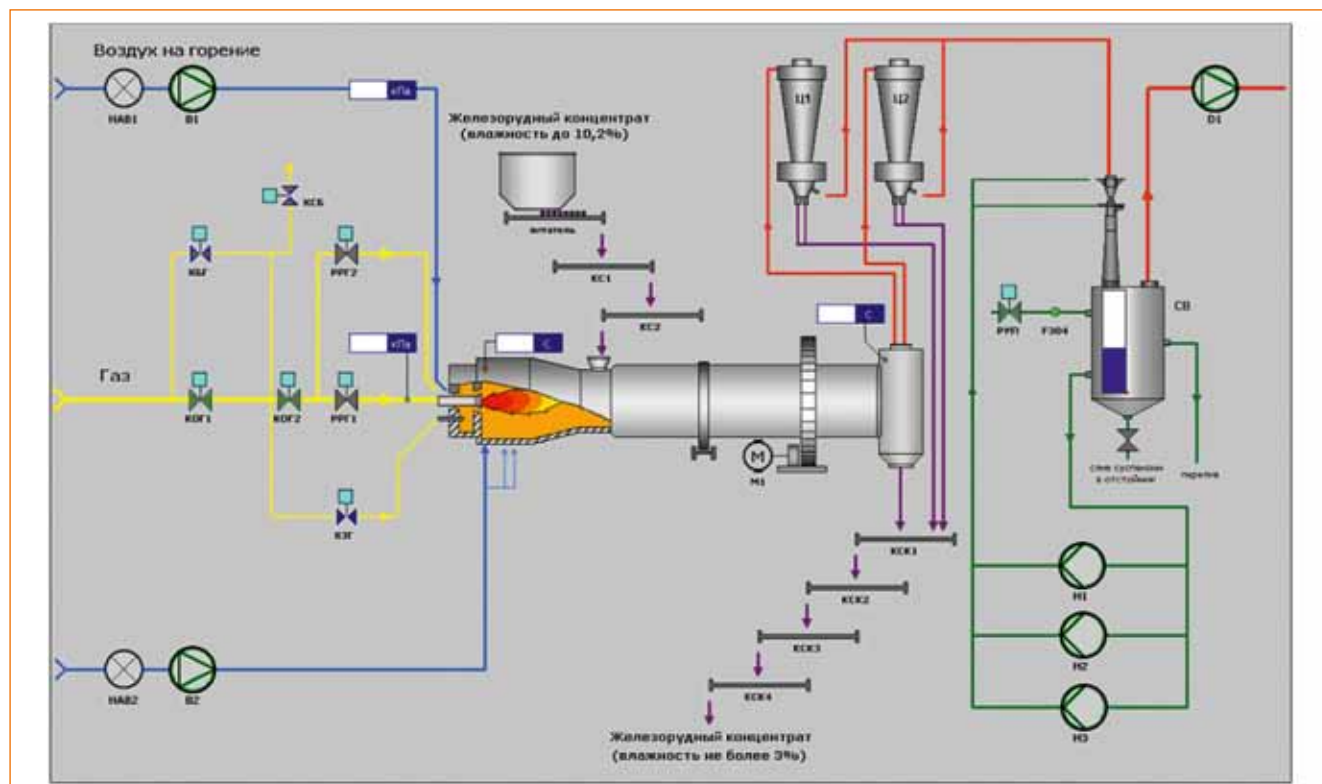
Сушильный барабан — это энергоемкий и достаточно сложный динамический объект, его работа зависит от нескольких внешних факторов.

Процесс оптимального сжигания топлива в топке затруднен действием возмущений, основными из которых являются:

- 1) изменчивость величины входной нагрузки сырья (влажный концентрат) при эксплуатации;
- 2) изменчивость состава топлива (изменение calorificity of gas);

РИСУНОК 1 Схема цепи аппаратов сушильного барабана № 1: Ц1, Ц2 — циклоны для 1-й ступени сухой очистки отходящих газов от мелкодисперсных примесей железорудного концентрата; СВ — скруббер Вентури; В1, В2 — вентиляторы для подачи воздуха в топочную камеру сушильного барабана на горение и разбавление; Д1 — дымосос для отсоса отходящих газов; Н1, Н2, Н3 — насосы

FIGURE 1 Circuit of drying drum apparatus № 1: Ц1, Ц2 — cyclones for 1-st step dry cleaning of exhaust gases from fine impurities of iron ore concentrate; СВ — Venturi scrubber; В1, В2 — air supply fans into the furnace chamber of drying drum for combustion and dilution; Д1 — flue gas exhaust system; Н1, Н2, Н3 — pumps



Примечания/Notes. Воздух на горение — Combustion air. Железорудный концентрат (влажность до 10,2%) — Iron-ore concentrate (moisture up to 10,2%). Железорудный концентрат (влажность не более 3%) — Iron-ore concentrate (moisture no more than 3%). Слив суспензии в отстойник — Drainage of the slurry into a settling tank. Перелив — Overflow.

ТАБЛИЦА 1 Технические характеристики процесса сушки концентрата

TABLE 1 Technical characteristics of the concentrate drying process

№ п/п No.	Характеристика Characteristics	Значение Value
1	Производительность по сушеному концентрату, т/ч. Dried concentrate throughput, t/h	150
2	Процентное содержание влаги в исходном сырье, %, не более. Moisture percentage in the feedstock, %, no more than	10,2
3	Процентное содержание влаги в сушеном концентрате, %. Moisture percentage in the dried concentrate, %	3,0–3,5
4	Процентное содержание контрольного класса крупности — 0,045 мм, %, не менее. Percentage content of the reference particle size class — 0,045 mm, %, not less	88
5	Угол естественного откоса влажного исходного продукта, град. Angle of natural slope of the moist source product, deg.	39
6	Угол естественного откоса сухого продукта, град. Angle of natural slope of dry product, deg.	30
7	Насыпной вес влажного концентрата, т/м ³ . Bulk weight of wet concentrate, t/m ³	2,75
8	Насыпной вес сушеного концентрата, т/м ³ . Bulk weight of dried concentrate, t/m ³	2,38
9	Вид топлива горелки. Burner fuel type	Природный газ Natural gas
10	Расчетный расход природного газа, м ³ /ч. Design natural gas flow rate, m ³ /h	1 250
11	Расчетный расход воздуха на горение, н·м ³ /ч. Design combustion air flow rate, n·m ³ /h	11 940
12	Расчетный объемный расход воздуха на транспортировку топочных газов, м ³ /ч. Design air flow rate for transporting flue gases, m ³ /h	18 280
13	Расчетный объемный расход воды на орошение скруббера, м ³ /ч. Design water flow rate for scrubber irrigation, m ³ /h	60
14	Расход воды на подпитку в систему мокрой очистки, м ³ /ч. Water consumption for feeding into the water wash system, m ³ /h	10
15	Температура в топке, °С. Temperature in the furnace, °С	850
16	Температура газов на выходе из сушильного барабана, °С. Gas temperature at the outlet of the drying drum, °С	100–120
17	Температура сушеного концентрата на выходе из сушилки, не более, °С. Temperature of dried concentrate at the outlet of the dryer, no more, than, °С	90
18	Унос пыли в атмосферу с отходящим воздухом, не более, мг/м ³ . Dust carry-over into the atmosphere with exhaust air, no more than, mg/m ³	50

3) изменение температуры и влажности воздуха на горение;

4) изменения характеристик горелок в процессе колебания их мощности;

5) отсутствие контроля герметичности барабана (возможный подсос воздуха в зонах загрузки и выгрузки).

Регулирование соотношения «воздух/газ» сушильных барабанов ведется по режимным картам, настроенным на единственный режим при наладке.

ОСНОВЫ СЖИГАНИЯ ГАЗА

Газ и воздух представляют собой смесь нескольких химических веществ.

Горючими составляющими являются углеводородные соединения, водород и угарный газ. Эти

составные части сгорают при участии кислорода воздуха.

При сгорании смеси газа и воздуха горючие составляющие реагируют с кислородом (рис. 2). Полное сгорание характеризуется тем, что в реакции участвует такое количество кислорода, которое необходимо теоретически.

При недостатке воздуха углерод сгорает не полностью. В этом случае в результате реакции выделяется угарный газ, а также водород. Может образовываться сажа.

Из-за внешних возмущений, описанных выше, возникает недостаток воздуха и образование вредных веществ. Как следствие, возможен перерасход энергоресурсов. Для того чтобы избежать этого, горелку настраивают на большее количество поступающего воздуха. В таком случае сгорание происходит

при его избытке. Однако оно характеризуется дополнительной потерей тепла. Но этот избыток воздуха должен быть минимальным, чтобы теплотери были наименьшими.

Коэффициент избытка воздуха α — отношение количества воздуха, действительно подаваемого в топку, к теоретически необходимому.

$$\alpha = \frac{Q_{\text{возд. действ.}}}{Q_{\text{возд. теорет.}}}$$

Таким образом, с уменьшением избытка воздуха:

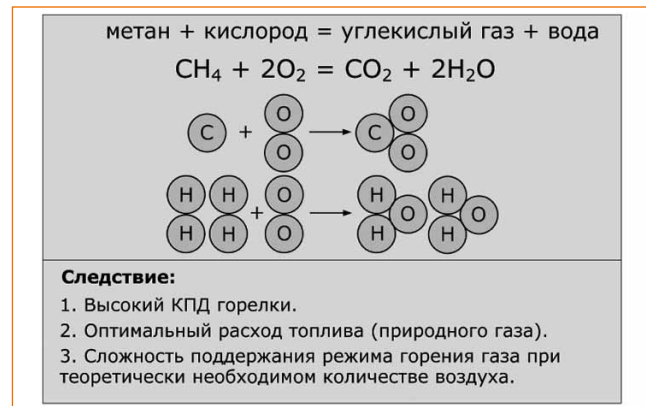
- увеличивается в процентном отношении содержание углекислого газа в дымовых газах;
- уменьшается в процентном отношении содержание несгоревших остатков кислорода в дымовых газах;
- повышается КПД благодаря сокращению потерь тепла.

Условия оптимального сгорания газа:

- реакция горения полностью окислительная (отсутствие недостатка воздуха);
- минимальный избыток воздуха (остаточное содержание кислорода минимально).

РИСУНОК 2 Процесс полного сгорания газа

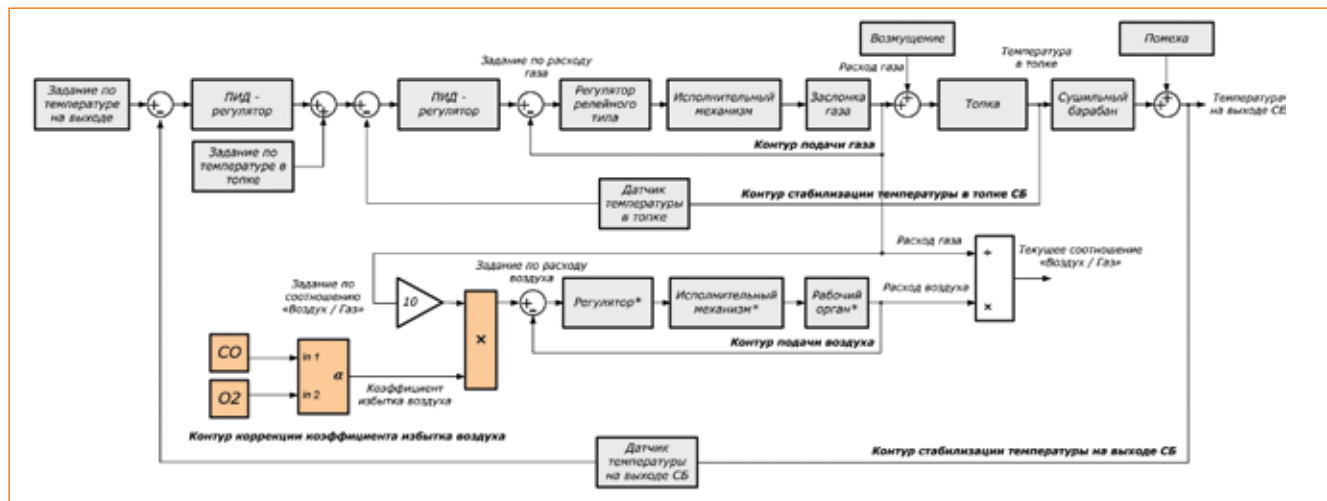
FIGURE 2 The process of complete gas combustion



Примечания/Notes: метан + кислород = углекислый газ + вода — methane + oxygen = carbon dioxide + water. Следствие — Effect. Высокий КПД горелки — High burner efficiency. Оптимальный расход топлива (природного газа) — Optimal fuel (natural gas) consumption. Сложность поддержания режима горения газа при теоретически необходимом количестве воздуха — Difficulty in maintaining gas combustion mode with the theoretical amount of air.

РИСУНОК 3 Структура подсистемы управления тепловым режимом сушильного барабана с использованием метода контроля состава отходящих газов

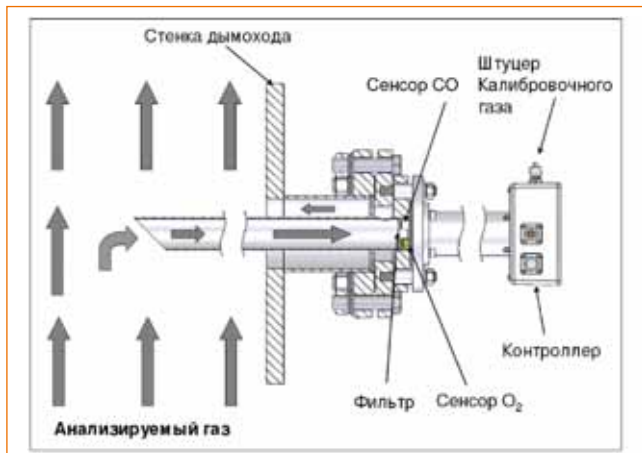
FIGURE 3 Structure of the subsystem for heat control of drying drum with controlling the composition of exhaust gases



Примечания/Notes. Задание по температуре на выходе — Outlet temperature setting. ПИД-регулятор — PID controller. Задание по температуре в топке — Furnace temperature setting. Задание по расходу газа — Gas flow rate setpoint. Регулятор релейного типа — On-off controller. Исполнительный механизм — Actuating mechanism. Заслонка газа — Gas damper. Расход газа — Gas flow rate. Возмущение — Perturbance. Топка — Furnace. Температура в топке — Furnace temperature. Сушильный барабан — Drying drum. Помеха — Disturbing factor. Температура на выходе СБ — DD outlet temperature. Контур подачи газа — Gas supply circuit. Контур стабилизации температуры в топке СБ — DD furnace temperature stabilization circuit. Текущее соотношение «воздух/газ» — Current air/gas ratio. Расход воздуха — Air flow rate. Контур подачи воздуха — Air supply circuit. Задание по расходу воздуха — Air flow rate setting. Задание по соотношению «воздух/газ» — Air/gas ratio setting. Коэффициент избытка воздуха — Excess air ratio setting. Контур коррекции коэффициента избытка воздуха — Excess air correction circuit. Контур стабилизации температуры на выходе СБ — DD exhaust air temperature stabilization circuit. Датчик температуры в топке — Furnace temperature sensor. Регулятор* — Regulator*. Исполнительный механизм* — Actuating mechanism*. Рабочий орган* — Driven element*. Датчик температуры на выходе СБ — Temperature sensor at the DD outlet.

РИСУНОК 4 Конструктивное решение процесса анализа отходящих газов

FIGURE 4 Design scheme for analysis of exhaust gases



Примечания/Notes. Стенка дымохода — Flue wall. Сенсор СО — CO sensor. Штуцер калибровочного газа — Calibration gas nozzle. Контроллер — Controller. Сенсор O₂ — O₂ sensor. Фильтр — Filter. Анализируемый газ — Sampled gas.

Заключение

Наиболее перспективным методом определения текущих постоянно меняющихся условий сжигания топлива в топке является оценка состава продуктов горения в отходящих газах с использованием стационарного газоанализатора (СО, O₂). Таким образом, существует возможность построения адаптивной системы, которая будет иметь возможность оперативно подстраивать коэффициент α (канал тонкой подстройки воздуха на горение) на основе оперативной информации с газоанализатора [12, 13].

Существующая система управления тепловым режимом каждого сушильного барабана состоит из следующих контуров управления:

- подачи газа;
- подачи воздуха;
- стабилизации температуры в топке сушильного барабана;
- стабилизации температуры на выходе из сушильного барабана.

В состав существующей системы предлагается включить дополнительный элемент управления — контур коррекции коэффициента избытка воздуха α (рис. 3) [14, 15, 16]. Его возможное конструктивное решение представлено на рис. 4 [17].

Таким образом, разработана структура подсистемы управления тепловым режимом сушильного барабана с адаптивной оптимизацией процесса горения топлива. В ней адаптация может осуществляться как автоматически, так и по запросу оператора.

Успешная реализация данного подхода адаптивного управления сушильным барабаном позволит:

- 1) точно вести процесс горения в топке в оптимальном режиме;
- 2) повысить эффективность производства за счет сокращения удельного расхода энергоресурсов (снизить расход газа на 5–15%);
- 3) снизить предельно допустимые выбросы (ПДВ) вредных веществ в атмосферу.

Сложности реализации этого метода (риски):

- 1) отсутствие опыта использования устройств анализа отходящих газов на сушильных барабанах;
- 2) повышенные требования к надежности прибора анализа отходящих газов;
- 3) могут потребоваться более точные устройства регулирования подачи воздуха на горение;
- 4) технический проект с экспертизой промышленной безопасности.

Данная методология адаптивного управления может быть применима для таких классов объектов, как:

- сушильные барабаны;
- паровые и водогрейные котлы;
- обжиговые машины;
- промышленные печи.

Литература/References

1. Степанов В.А., Меркер Э.Э., Крахт Л.Н. Повышение эффективности дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи. Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015; 7 (1387): 61–64. [Stepanov V.A., Merker E.E., Krakht L.N. Improving the efficiency of the afterburning of combustible gases in a steel furnace. Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. 2015; 7 (1387): 61–64. (In Russ.).]
2. Уварова Л.В. Модернизация сушильной установки для приготовления бентонитовой глины на ФО АО «ЛГОК». Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016: 109–111. [Uvarova L.V. Modernization of the drying machine for the preparation of bentonite clay at ore-processing plant JSC Lebedinsky GOK. Proceedings of XIII All-Russian scientific and practical conference with international participation «Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and manufacturing». 2016: 109–111. (In Russ.).]
3. Sabanin V.R., Starostin A.A., Repin A.I., Popov A.I. Study of connected system of automatic control of load and operation efficiency of a steam boiler with extremal controller on a simulation model. Thermal Engineering. 2017; 2 (64): 151–160.
4. Revun M.P., Zinchenko V.Y., Ivanov V.I., Cheprasov A.I. Optimal thermal control of a chamber furnace. Steel in Translation. 2018; 8 (48): 505–508.
5. Zykov A., Junín V. Automatic control system for the drum dryer. The Scientific Heritage. 2020; 2 (49): 64–66.
6. Hammer F., Weber H. Sensorgesteuerte CO-Regelung zur Optimierung des Verbrennungsprozesses für Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung. LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG, Druckschrift Nr. DLT 5014.06aD_0001.
7. Тележко Г.М., Ягов Г.В. Газоанализаторы для современных ресурсоэнергосберегающих систем в теплоэнергетике и теплоснабжении. Энергоназор-Информ. 2008; 4: 62–64. [Telezhko G.M., Yagov G.V. Gas analyzers for modern resource-and-energy-saving systems in heat power engineering and heat supply. Energonadzor-Inform. 2008; 4: 62–64. (In Russ.).]

8. Денисов А.Ю. Внедрение автоматизированного электропривода в систему «шламовый насос — гидроциклон» на Балхашской обогатительной фабрике. Автоматизация, мехатроника, информационные технологии. Материалы VI Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых. 2016: 27–30. [Denisov A.Yu. Introduction of an automated electric drive into the «slurry pump — hydrocyclone» system at the Balkhash concentrating plant. Proceedings of VI International scientific and technical Internet conference of young scientists «Automation, mechatronics, information technologies». 2016: 27–30. (In Russ.)].
9. Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. Синтез интеллектуальной системы автоматического управления процессом горения топлива в энергоблоках тепловых электростанций. Промышленная теплотехника. 2012; 5 (34): 45–52. [Mikhailenko V.S., Kharchenko R.Yu. Synthesis of an intelligent system for automatic control of the fuel combustion process in power units of thermal power plants. Industrial Heating Technology. 2012; 5 (34): 45–52. (In Russ.)].
10. Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Ляховец М.В. и др. Развитие автоматизированной системы управления технологическими процессами обогатительной фабрики. Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. 2018; 4: 316–323. [Myshlayev L.P., Makarov G.V., Lyakhovets M.V. et al. Development of an automated control system for technological processes of the ore-concentration plant. Science-intensive Technologies for the Development and Use of Mineral Resources. 2018; 4: 316–323. (In Russ.)].
11. Паранин А.Д., Тележко В.М., Тутчев М.В., Хойна Е.В. Электрохимический сенсор для контроля концентрации HCN в воздухе рабочей зоны. Датчики и системы. 2016; 12: 49–54. [Paranin A.D., Telezhko G.M., Tyutchev M.V., Khoyna E.V. Electrochemical sensor for monitoring the concentration of HCN in the air of the working area. Sensors and Systems. 2016; 12: 49–54. (In Russ.)].
12. Деревяшкин И.В., Садыков А.А. Основные технологические процессы, их проблемы и решения на Калининградском янтарном комбинате. Технический оппонент. 2018; 1 (1): 58–67. [Derevyashkin I.V., Sadikov A.A. The main technological processes, their problems and solutions at the Kaliningrad amber combine. Tekhnicheskii opponnet = Technical Opponent. 2018; 1 (1): 58–67. (In Russ.)].
13. Кондрашов В.П., Лыков А.Г., Погребисский М.Я. Пути повышения технико-экономической эффективности рудовосстановительных электропечей. Технический оппонент. 2020; 1 (6): 23–29. [Kondrashov V.P., Lykov A.G., Pogrebisskiy M.Ya. Ways to increase technical and economic efficiency of ore-smelting electric furnaces. Tekhnicheskii opponnet = Technical Opponent. 2020; 1 (6): 23–29. (In Russ.)].
14. Тележко Г.М., Хойна Е.В., Ягов Г.В. Новый подход к оптимизации режимов горения топлива. Энергоназор-Информ. 2008; 1: 26–28. [Telezhko G.M., Khoyna E.V., Yagov G.V. A new approach to optimizing fuel combustion modes. Energonadzor-Inform. 2008; 1: 26–28. (In Russ.)].
15. Газоанализаторы многокомпонентные «ОПТИМА». Руководство по эксплуатации, ЛШЮГ.413411.014 РЭ. Санкт-Петербург, 2004 г. [Multicomponent gas analyzers «ОПТИМА». Operation manual, LSHYUG.413411.014 OM. St. Petersburg, 2004. (In Russ.)].
16. Газоанализаторы многокомпонентные «АНГОР-С». Руководство по эксплуатации, ЛШЮГ.413411.021 РЭ. Санкт-Петербург, 2011 г. [Multicomponent gas analyzers «ANGOR-S». Operation manual, LSHYUG.413411.021 OM. St. Petersburg, 2011. (In Russ.)].
17. Тележко Г.М., Хойна Е.В. Использование газоанализаторов для оптимизации режимов горения топлива. Новости теплоснабжения. 2015; 4: 27–31. [Telezhko G.M., Khoyna E.V. Using gas analyzers to optimize fuel combustion modes. Heat Supply News. 2015; 4: 27–31. (In Russ.)].

Вклад авторов. И.В. Деревяшкин, М.Е. Тараненко, А.А. Казанцев: разработка дизайна исследования, получение данных для анализа, обзор публикаций по теме статьи, статистический анализ полученных данных, написание текста рукописи.

Authors contributions. I.V. Derevyashkin, M.E. Taranenko, A.A. Kazantsev: development of research design, obtaining data for analysis, review of publications on the topic of the article, statistical analysis of the data obtained, paper writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declares no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Financing. The study was performed without external funding.

Статья поступила: 15.11.2021. **Принята к публикации:** 12.01.2022.

Article received: 15.11.2021. **Accepted for publication:** 12.01.2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Деревяшкин Игорь Владимирович, профессор, д.т.н., профессор кафедры техники и технологии горного и нефтегазового производства, Московский политехнический университет. Адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38. Телефон: +7 (495) 223-05-23. E-mail: mospolytech@mospolytech.ru. Профессор кафедры горного дела, филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Губкин*. ORCID: 0000-0002-1520-34550.

Тараненко Максим Евгеньевич, к.т.н., ведущий специалист, заместитель главного энергетика (по автоматизации), АО «Лебединский ГОК». Адрес: 309191, г. Губкин, промышленная зона «Промплощадка ЛГОКа». Телефон: +7 (472) 149-58-49. E-mail: info@metalloinvest.com. Доцент кафедры горного дела филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Губкин*.

Казанцев Антон Александрович, к.т.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой металлургии и металловедения имени С.П. Угаровой, филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Губкин*.

* Адрес: 309186, г. Губкин, ул. Комсомольская, д. 16.

Телефон: +7 (472) 415-51-83. E-mail: gf@misis.ru.

AUTHORS INFORMATION

Derevyashkin Igor Vladimirovich, Professor, DScTech, Professor of the Department of Mining Engineering and Technology of Mining, Oil and Gas Production, Moscow Polytechnic University. Address: 38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, 107023.

Phone: +7 (495) 223-05-23. E-mail: mospolytech@mospolytech.ru.

Professor, Department of Mining Engineering, Gubkin branch of National Research Technological University «MISIS»*.

Taranenko Maxim Yevgenyevich, PhD in Technology, Leading Specialist, Deputy Chief Power Engineer (Automation), Lebedinsky GOK JSC. Address: 309191, Gubkin, Lgoka industrial area. Phone: +7 (472) 149-58-49. Associate Professor, Mining Engineering Department, Gubkin branch of National Research Technological University «MISIS»*.

Kazantsev Anton Aleksandrovich, PhD in Technology, Associate Professor, Deputy Head of Metallurgy and Metal Science Department, S.P. Ugarova, Gubkin branch of National Research Technological University «MISIS»*.

* Address: 16 Komsomolskaya St., Gubkin, 309186.

Phone: +7 (472) 415-51-83. E-mail: gf@misis.ru.

Концептуальный анализ мощности морских ветроэнергетических установок при работе в арктических условиях



Conceptual Analysis of the Capacity of Offshore Wind Power Plants When Operating in Arctic Conditions

АВТОРЫ

AUTHORS

А.Е. Харсеев¹, А.С. Большев², д.т.н.,
С.А. Фролов², к.т.н., доцент,
В.В. Елистратов², д.т.н., профессор,
А.А. Панфилов², к.т.н.

A.E. Kharseev¹, A.S. Bolshev²,
S.A. Frolov², V.V. Elistratov²,
A.A. Panfilov²

¹ АО «ГТ Морстрой», г. Санкт-Петербург, Россия
² Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

¹ GT Morstroy JSC, St. Petersburg, Russia
² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University, Saint-Petersburg, Russia

РЕЗЮМЕ

SUMMARY

Создание морских ветроэнергетических установок (МВЭУ), способных работать в суровых арктических условиях, является трудоемким процессом. На большей части арктической зоны не развита инфраструктура, нет квалифицированной рабочей силы. В подобном климате тяжело строить и поддерживать в работоспособном состоянии технически сложное оборудование и устройства. Для арктических ВЭУ требуется обеспечить высокий уровень надежности при работе в суровых внешних условиях, использовать подходящие для экстремально низких температур материалы, технологию возведения. В настоящей работе рассматриваются вопросы концептуального проектирования морских стационарных ветроэнергетических установок, предназначенных для функционирования в арктической зоне. Анализируются возможные конструктивные решения, оцениваются внешние нагрузки на перспективные варианты стационарных платформ, предлагается подход к выбору мощности ВЭУ для обеспечения экономической перспективности ее строительства и эксплуатации в условиях арктических морей.

Building offshore wind power plants capable of operating in harsh Arctic conditions is a labor-intensive process. Most of the Arctic zone lacks infrastructure and a skilled workforce. In such a climate, it is difficult to build and maintain technically complex equipment and devices. Arctic wind power plants require a high level of reliability when operating in harsh external conditions, using materials suitable for extremely low temperatures, and construction technology. This paper considers the conceptual design of offshore stationary wind power plants intended for operation in the Arctic zone. Possible design solutions are analyzed, external loads on promising variants of stationary platforms are evaluated, and an approach to the selection of wind turbine capacity is proposed to ensure the economic viability of its construction and operation in the Arctic seas.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

KEYWORDS

ЛЕДОСТОЙКАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ
УСТАНОВКА, КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ,
ВНЕШНИЕ НАГРУЗКИ, МОЩНОСТЬ
АРКТИЧЕСКИХ ВЭУ

ICE-RESISTANT WIND POWER PLANT, CONCEPTUAL
VARIATIONS, EXTERNAL LOADS, CAPACITY
OF ARCTIC WIND POWER

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

FOR CITATION

Харсеев А.Е., Большев А.С., Фролов С.А.
и соавт. Концептуальный анализ мощности
морских ветроэнергетических установок при
работе в арктических условиях. *Технический
оппонент*. 2022; 1 (8): 41–50.

Kharseev A.E., Bolshev A.S., Frolov S.A. et al.
Conceptual analysis of the capacity of offshore
wind power plants when operating in arctic
conditions. *Technicheskii opponent = Technical
Opponent*. 2022; 1 (8): 41–50.

Введение

В большинстве районов российской Арктики отсутствуют источники централизованного электроснабжения. Используемые в этой зоне дизельные электростанции поставляют довольно дорогую электроэнергию. Кроме того, обеспечение их топливом связано со сложными логистическими проблемами. По этим причинам использование морских ветроэнергетических установок выглядит перспективным. Ключевой проблемой становятся затраты на создание таких ВЭУ. Очевидно, что развитие морской ветроэнергетики возможно только тогда, когда на арктические ветровые установки будет приемлемая цена, чтобы конкурировать с иными источниками энергии.

Металлоемкость и стоимость морских ВЭУ определяется их составляющими, мощностью установленного на них генератора, уровнем внешних нагрузок, воздействующих на опорную часть и ветроколесо.

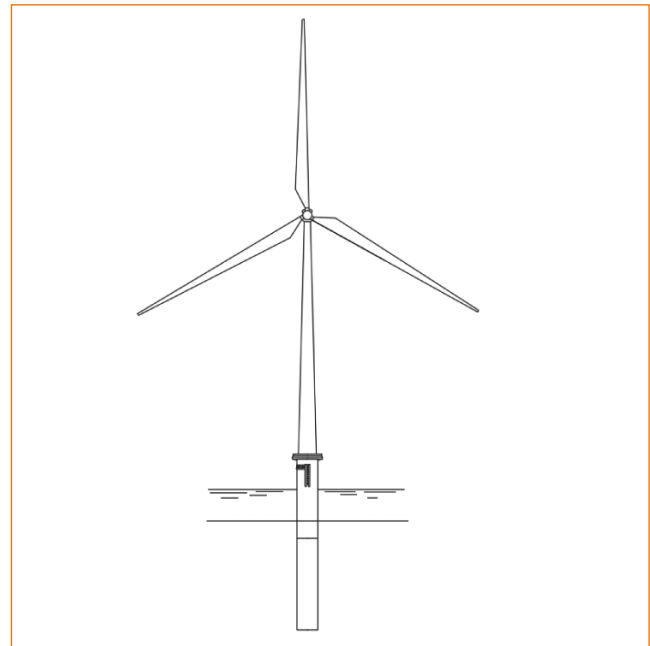
Конструкции таких ветроэнергетических установок существенно зависят от глубины моря. Обычно при относительно малых значениях используются ВЭУ на стационарном основании. По мере увеличения глубины моря наиболее привлекательными становятся ветроэнергетические установки, размещаемые на плавучем основании. Вопросам поиска концептуальных решений для плавучих арктических ВЭС посвящена ранее опубликованная статья авторов [1]. В настоящей работе рассматриваются концептуальные вопросы проектирования стационарных морских ВЭУ в арктических условиях.

Основными внешними воздействиями на морские стационарные арктические ВЭУ являются нагрузки от ветра и ледовых образований. Первые определяются размерами ветроколеса и мощностью генератора. Ветровая нагрузка является полезной, так как именно она генерирует энергию. Нагрузка от ледовых образований обусловлена зоной размещения ВЭУ. При этом она никак не влияет на выработку электроэнергии. С ростом мощности генераторов ВЭУ увеличиваются размеры ветроколеса, масса самого генератора и элементов конструкции, линейные размеры опорного основания ветроэнергетической установки. Вследствие этого повышаются ветровые и ледовые нагрузки. Поиск компромисса между ними при создании арктической ВЭУ обеспечивает нахождение наиболее экономичного решения.

В настоящей работе на примере ряда уже сконструированных ветроэнергетических установок с различными по мощности генераторами рассматривается возможность размещения аналогичных конструкций в арктических условиях. Для оценки целесообразности использования той или иной ВЭУ в арктической зоне необходимо выяснить, какие внешние воздействия будут доминировать при определении параметров ее элементов. Для каждого варианта конструкции следует оценить ветровые нагрузки на ветроколесо и опорную башню, а также определить опрокидывающие моменты. Важно учесть и различные уровни ветровой нагрузки, глубины постановки ВЭУ. Кроме того, необходимо рассчитать ледовые нагрузки на опорную башню ветроэнергетических установок при различных толщинах ровного

РИСУНОК 1 Конструкция ВЭС типа «монопод»

FIGURE 1 Monopod type WPP design



льда, глубинах моря, а также вычислить опрокидывающие моменты. Сопоставляя уровень нагружения конструкции ветровой и ледовой нагрузкой при разных мощностях используемых ветрогенераторов, представляется возможным определить перспективные варианты концептуальных решений при создании арктических морских стационарных ВЭУ.

Концептуальные варианты конструкции стационарных ВЭУ

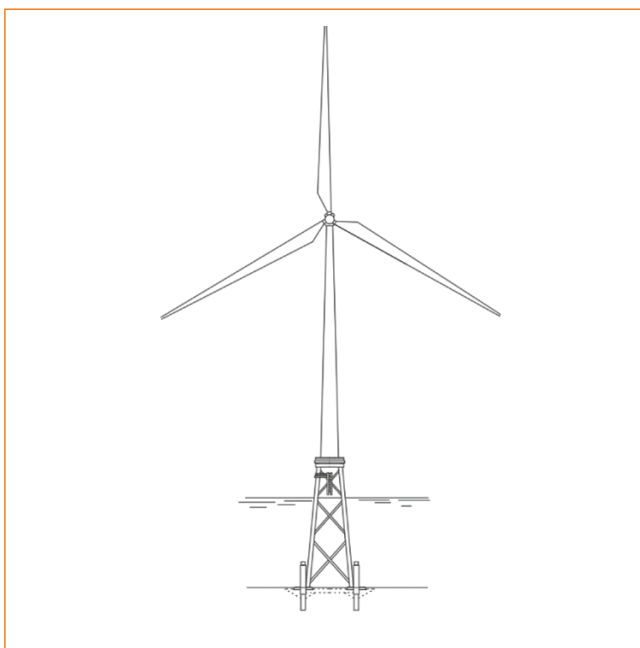
Практика проектирования и строительства морских стационарных ВЭС сформировала ряд конструктивных решений, которые уже реализованы и успешно работают в различных акваториях [2]. Как правило, они создавались для условий незамерзающих морей, поэтому применение их при наличии льдов требует дополнительного анализа.

На рис. 1 представлена схема одной из наиболее распространенных конструкций ВЭС типа «монопод». Башня этой ВЭУ поддерживается с помощью сваи диаметром несколько метров, при этом в большинстве случаев между башней и свайей устанавливается переходная часть. Свая представляет собой трубу из стали или железобетона, обычно сужающуюся к верхней части для более надежного крепления переходной. Значительная часть сваи погружается на морское дно, причем для конструкций из железобетона чаще всего используют метод бурения скважин и последующую цементацию пространства между свайей и грунтом дна.

При использовании такого решения в арктических условиях, помимо воздействий ветра, волнения и течения, добавляются ледовые нагрузки. Однако

РИСУНОК 2 ВЭС в виде решетчатой конструкции

FIGURE 2 Lattice structure wind power plant



они являются минимально возможными, так как площадь контакта конструкции с образованиями льда ограничена сравнительно небольшим диаметром опорной колонны. Ограничения на вероятность применения такого решения в ледовых условиях будут связаны лишь с необходимостью увеличения глубины забивки свай для противодействия повышенному опрокидывающему моменту от внешних нагрузок.

На рис. 2 изображена схема ВЭС с опорным основанием в виде решетчатой конструкции. Оно представляет собой трех- или четырехугольную ферму, имеющую одинаковый или мало изменяющийся угол наклона боковых элементов на всей высоте. Ферма передает нагрузку на дно с помощью погруженных в грунт через направляющие рукава свай на краях опор. Эта конструкция оказывается наиболее привлекательной при установке ВЭС на больших глубинах моря (до 45 м). Однако в таких условиях пространство внутри фермы может быстро заполниться льдом, и ледовые нагрузки окажутся критическими для возможности ее безопасной эксплуатации.

На рис. 3 показана схема конструкции трехсвайного типа, представляющая собой объединение трех одиночных свай в единое основание посредством массивной переходной части. Одиночные сваи имеют меньший размер, чем у основания в виде монопода. Схема возведения трехсвайного типа основания схожа с моноподом, однако переходная часть устанавливается на верхние трех заранее погруженных свай. Затем она омоноличивается с ними раствором. На переходную часть устанавливается стальная башня ВЭУ. В конструкции в виде трехсвайного основания противодействие опрокидывающему моменту можно регулировать не только посредством глубины забивки свай, но и с помощью увеличения плеча восстанав-

РИСУНОК 3 Конструкция ВЭС трехсвайного типа

FIGURE 3 Construction of a three-pile wind power plant

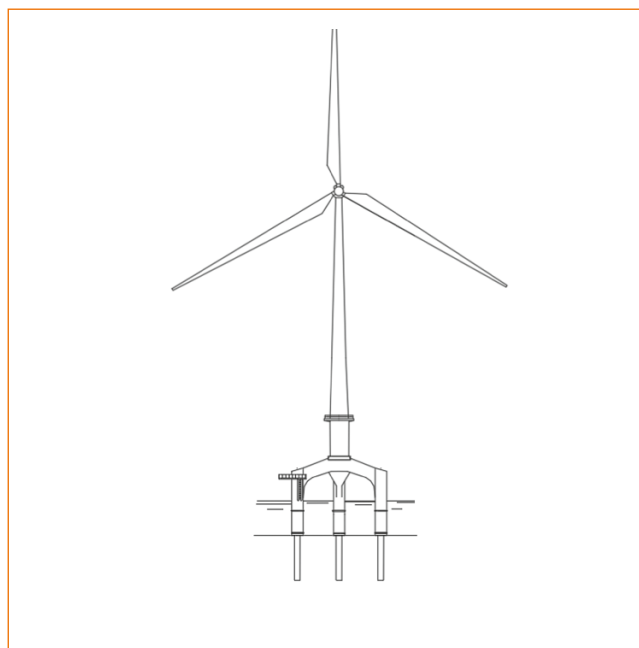
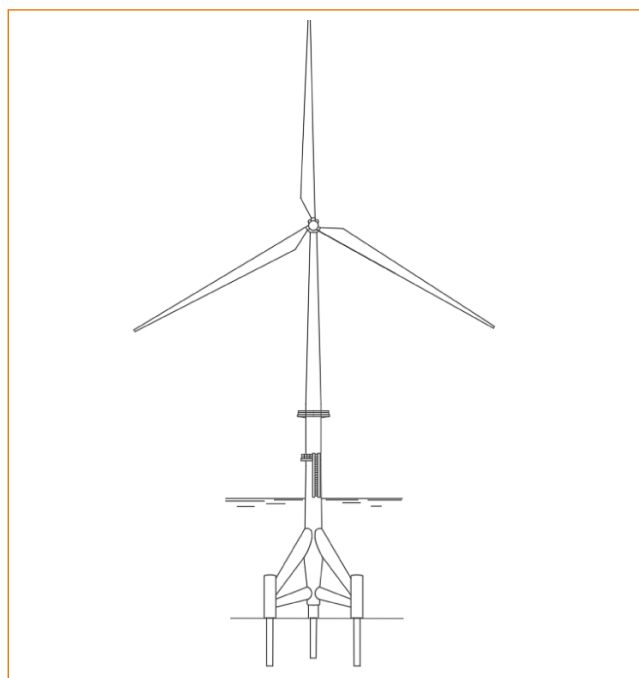


РИСУНОК 4 Конструкция ВЭС типа «трипод»

FIGURE 4 The design of a tri-pod wind power plant



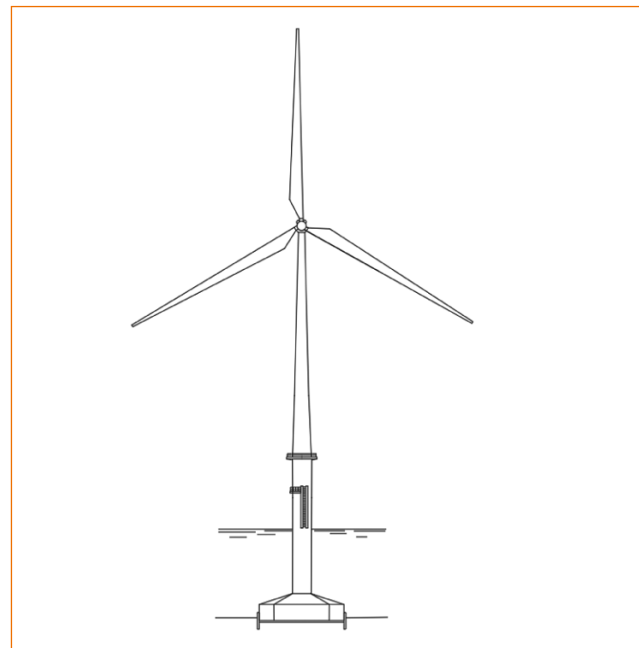
ливающего момента, разнося сваи в горизонтальной плоскости на большее расстояние. Такой подход хорошо зарекомендовал себя в условиях незамерзающих морей [3], однако при наличии льдов три опоры приведут к большей ледовой нагрузке, чем у монопода.

На рис. 4 отражена схема ВЭС типа «трипод». Такое основание представляет собой стальную ферменную конструкцию, с помощью которой вертикальные и горизонтальные нагрузки от сооружения передаются на три сваи. Последние разведены в стороны от вертикальной оси башни ВЭУ и погружены на морское дно через направляющие отверстия на концах опор. В отличие от монопода, сваи в данном варианте основания имеют меньший размер. При этом они погружаются на меньшую глубину в грунт дна, так как несущая способность свайного основания можно регулировать, разнося сваи на большее расстояние. Такая конструкция имеет повышенную устойчивость и общую жесткость, что важно при возникновении дополнительных ледовых нагрузок. Наклонные раскосы основания целесообразно размещать ниже уровня воды. В таком случае нагрузка льда будет минимальной, определяясь только взаимодействием ледовых образований с башней ВЭС. Слабым местом конструкции чаще всего являются узлы сопряжения раскосов друг с другом.

На рис. 5 изображена схема ВЭС с гравитационным основанием. Последнее представляет собой стальное или железобетонное сооружение, устанавливаемое на подготовленное дно и обеспечивающее устойчивость ВЭС посредством своего веса. Основания из железобетона чаще всего имеет строение массива-

РИСУНОК 5 Конструкция ВЭС с основанием гравитационного типа

FIGURE 5 Construction of WPP with gravity base



ориентироваться на возможность минимизации ледовых воздействий. Кроме того, необходимо оценивать обеспечение устойчивости ВЭС с минимальными затратами на конструктивные материалы.

С точки зрения минимизации ледовых воздействий подходят конструкции с минимальными конструктивными размерами на уровне ватерлинии. Это варианты ВЭС с опорными основаниями в виде монопода, трипода, а также гравитационного типа.

С точки зрения обеспечения устойчивости с минимальными затратами конструктивных материалов целесообразно использовать сооружения, позволяющие управлять запасами устойчивости не только за счет собственного веса, глубины забивки свай, но и посредством увеличения плеча, восстанавливающего момента. Этому требованию соответствуют конструкции трехсвайного и гравитационного типа, а также в виде трипода.

Таким образом, наиболее перспективным в экстремальных ледовых условиях представляется решение с основанием гравитационного типа, а также в виде трипода. Однако при умеренных ледовых воздействиях и определенном сочетании иных факторов вполне применимыми могут оказаться ВЭС с конструкцией трехсвайного типа или в виде монопода.

Методы расчета внешних нагрузок на ВЭУ

В рамках настоящей работы проводилось сопоставление ветровой нагрузки на ВЭУ с ледовой, которая будет действовать на анализируемые решения в условиях арктических морей. Воздействия течений и волнений не анализировались, так как они

Таким образом, наиболее перспективным в экстремальных ледовых условиях представляется решение с основанием гравитационного типа, а также в виде трипода

гиганта, внутренняя полость которого заполняется песком, камнем, железной рудой или другими материалами. В центре устраивается стальной элемент для передачи нагрузки от башни на дно. Возможна транспортировка сооружения без использования барж благодаря плавучести основания без загрузки балластом. Преимуществом такой конструкции является простая технология установки на дно без использования кранов методом балластировки, отсутствие переходной части между основанием и башней ВЭУ. К недостаткам относятся необходимость подготовки дна, мероприятий по его защите от размыва, сложное изготовление бетонной оболочки больших размеров и наличие материально-технического оснащения. В арктической зоне такая конструкция должна обеспечивать устойчивость за счет собственного веса и линейных размеров гравитационного основания.

Анализируя целесообразность применения того или иного решения в ледовых условиях, следует

не могли существенно повлиять на сопоставительный анализ конструкций.

При расчете ледовых нагрузок на ВЭУ использовались российские нормативные подходы [4], максимально приближенные к документу ISO [5].

Нагрузка от поля ровного льда на цилиндрическую преграду рассчитывалась по формуле: $F_i = mk_L k_v R_c D^{0,85} h^{0,9}$, где F_i — ледовая нагрузка, m — коэффициент формы опоры ($m = 0,9$ — для цилиндрических преград), R_c — прочность льда, D — диаметр опоры, h — толщина ледового поля, k_L — коэффициент, зависящий от соотношения размеров опоры и ледового поля ($k_L = 1$, так как диаметр преграды полагался в 10 раз меньше характерного размера ледяного поля), k_v — коэффициент скорости деформации льда ($k_v = 1$, так как скорость движения льдов бралась больше $0,03 h$).

Нагрузка от ветра определяется как сумма ветровых воздействий на ветровое колесо и на башню ВЭУ. Ветровая нагрузка на башню ветроэнергетической установки рассчитывается по формуле:

$$F_{wind1} = \frac{1}{2} \rho_a C_D \int V^2(z) D(z) dz,$$

где F_{wind1} — ветровая нагрузка на башню ВЭУ, ρ_a — плотность воздуха, C_D — коэффициент сопротивления башни, $V(z)$ — скорость ветра в зависимости от вертикальной координаты z , $D(z)$ — диаметр башни ВЭУ в зависимости от вертикальной координаты z .

Ветровая нагрузка на ветроколесо ВЭУ для рабочего режима определяется по формуле [6]:

$$F_{wind2} = \frac{1}{2} \rho_a C_D(\beta) V^2(z_0) S_w,$$

где F_{wind2} — ветровая нагрузка на ветроколесо для рабочего режима, $C_D(\beta)$ — коэффициент тяги ветрового колеса ВЭУ в зависимости от угла поворота лопастей β , $V(z_0)$ — скорость ветра на уровне оси вращения ротора, S_w — площадь ротора (ометаемая лопастями ВЭУ).

Ветровая нагрузка на ветроколесо ВЭУ для режима штормового отстоя рассчитывается по формуле [6]:

$$F_{wind3} = \frac{1}{2} n \rho_a C_D V^2(z_0) S_b,$$

где F_{wind3} — ветровая нагрузка на ветроколесо в режиме штормового отстоя, n — количество лопастей, C_D — коэффициент сопротивления лопасти, S_b — площадь лопасти.

Расчетные уровни внешних воздействий

Ветровая нагрузка на ВЭУ определяется параметрами расчетной скорости ветра, которая обычно задается на высоте 10 м от поверхности моря. Номинальная скорость на уровне оси ветроколеса (указывается в технических характеристиках ВЭУ), как правило, находится в диапазоне 12–15 м/с. Ветровые нагрузки при этом показателе рассчитывались в данной работе и назывались номинальными. Для рабочего режима ВЭС вычислялось также ветровое воздействие при максимально допустимой скорости

ветра, когда ВЭУ еще продолжает работу. В рассматриваемых в дальнейшем вариантах ВЭУ максимально допустимая скорость ветра ограничивается 25 м/с на уровне оси ветроколеса. Это расчетное значение принималось для анализа рабочего режима ВЭС при предельных ветровых нагрузках.

При больших показателях скорости ветра ветроколесо останавливается, его лопасти разворачиваются для минимизации ветрового воздействия. В этом штормовом режиме максимальную ветровую нагрузку собирает башня ВЭУ. Анализ ветровых условий на акватории арктических морей России показывает, что скорость ветра на высоте 10 м с осреднением 10 минут и повторяемостью один раз в сто лет не превышает 35 м/с [7, 8]. На уровне оси ветроколеса экстремальная скорость ветра достигает 50 м/с. Она назначается в качестве расчетной для анализа штормового ветрового режима. Изменение скорости ветра по высоте принималось согласно рекомендациям Российского морского регистра

$$\text{судоходства: } V_z = V_{10} \left[1 + \ln \left(\frac{z}{10} \right) \right]^{1/5},$$

где V_z — скорость ветра на высоте z от уровня моря, V_{10} — скорость ветра на высоте 10 м от уровня моря.

Ледовые нагрузки на ВЭС зависят от расчетных параметров толщины ледяного поля и его прочности. Эти показатели заметно различаются для таких морей Северного Ледовитого океана, как Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское

Ледовые нагрузки на ВЭС зависят от расчетных параметров толщины ледяного поля и его прочности. Эти показатели заметно различаются для таких морей Северного Ледовитого океана, как Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское. Лишь очень небольшая часть перечисленных акваторий свободна ото льда круглый год — это юго-западный район Баренцева моря. На северо-западе и северо-востоке этого моря льды держатся обычно круглый год. Максимальной толщины (1,6–2,0 м) ледовая поверхность достигает к маю. Температура воздуха ниже 0 °C держится от 7 до 10 месяцев в году. Минимальный температурный показатель достигает –46 °C.

Еще более суровые условия характерны для моря Лаптевых, где температура воздуха опускается до –55 °C. Отрицательные температурные значения держатся до 11 месяцев в году. Продолжительность существования сплошного ледового покрова — до 9–10 месяцев. Толщина льда может достигать 2–2,2 м. Летом он разрушается, частично тает, его относит к северу.

ТАБЛИЦА 1 Варианты ВЭУ

TABLE 1 Variants of wind power plants

№	Мощность, МВт Power, MW	Наименование турбин Name of turbines	Производитель Manufacturer
1	1,5	GW 70/1500 [9]	Xinjiang Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Chine
2	2,3	Siemens SWT-2.3–82 [10]	Siemens Wind Power A/S, Germany
3	3,0	Vestas V90 Offshore [11]	Vestas Wind Systems A/S, Denmark
4	3,6	SWT-3.6–107 Offshore [12]	Siemens Wind Power A/S, Germany
5	4,2	V117–4.2 MW [13]	MHI Vestas Offshore Wind A/S, Denmark
6	5,0	M5000–116 [14]	AREVA Wind GmbH, Germany
7	6,0	GE Haliade 150–6MW [15]	General Electric/GE Renewable Energy
8	7,0	SWT-7.0–154 [16]	Siemens Wind Power A/S, Germany
9	8,0	V164–8.0 MW [17]	MHI Vestas Offshore Wind A/S, Denmark
10	10	SG 10.0–193 DD [18]	Siemens Gamesa, Germany
11	12	Haliade-X 12 MW [19]	GE Renewable Energy, Germany

В Восточно-Сибирском море даже летом средняя температура воздуха держится около 0 °С. В зимнее время все море покрыто льдом. Летом от него очищается только прибрежная зона шириной несколько десятков километров. А в восточной части льды вообще не исчезают.

В Чукотском море сказываются теплые течения, идущие через Берингов пролив. Однако уже в октябре — ноябре все море покрывается льдом, который разрушается лишь в мае — июне. Таким образом, выбор расчетного значения толщины ледяных полей связан с конкретной акваторией, для которой производится анализ. Если характеризовать в целом арктические моря России, то экстремальные толщины льдов тяготеют к значению 2,0 м, которое и было принято в данной работе за расчетное. Экстремальная прочность ледового покрова также зависит от акватории, уровня отрицательных температур и длительности их воздействия. В частности, для условий, близких к морю Бофорта, прочность однолетних и многолетних морских льдов может достигать 2,8 МПа. По натурным данным, которые использовали авторы для выполнения расчетов различных сооружений в зоне российской Арктики, прочность морского ледового покрова не превышала 2,6 МПа для молодого однолетнего льда. Для

льдов экстремальной толщины, наблюдавшихся на арктических акваториях России, ближе к лету их прочность обычно не превышала 2,0 МПа. Учитывая, что для сопоставительного анализа берется экстремальное расчетное значение толщины ледяного поля, показатель его прочности в дальнейшем принимался на уровне 2,0 МПа.

Сопоставление ВЭУ с различной мощностью генераторов

Для сопоставления выбирались разные конструктивные варианты ВЭС, представленные в публикациях и отличающиеся различной мощностью установленных на них ветрогенераторов. Предполагается, что на этапе конструирования приняты все меры для обеспечения их прочности под действием ветровой нагрузки. Далее предусматриваются их установка в ледовых условиях и оценка дополнительного воздействия, которое на них оказывает ледяное поле. Если эта нагрузка несущественная, то можно утверждать, что все затраты на материалы и интегральная стоимость ВЭС направлены на выработку электроэнергии, по-

ТАБЛИЦА 2 Основные параметры ВЭУ

TABLE 2 Main parameters of wind power plants

P, МВт P, MW	D_r, м D_r, m	L_b, м L_b, m	S_w, м² S_w, m²	S_b, м² S_b, m²	D, м D, m	H_r, м H_r, m
1,5	70,3	34	3886	35	5,0	54
2,3	82,4	40	5300	48	5,0	60
3,0	90	44	6362	58	4,3	64
3,6	107	59	9000	104	6,0	80
4,2	117	57,5	10750	99	6,0	80
5,0	116	57	10570	98	6,0	80
6,0	151	74	17860	164	6,0	94
7,0	154	76	18600	173	7,0	96
8,0	164	81	21164	197	7,4	102
10,0	193	94	29300	265	8,5	116
12,0	220	107	38000	343	9,0	137

Примечание: P — мощность ветрогенератора, D_r — диаметр ротора, L_b — длина лопасти ветроколеса, D — диаметр колонны ВЭУ на уровне ватерлинии, H_r — высота оси ротора над уровнем моря.

Note: P — power of wind generator, D_r — diameter of rotor, L_b — length of wind wheel blade, D — diameter of wind turbine column at the waterline level, H_r — height of rotor axis above sea level.

этому такое решение экономически целесообразно. Если, напротив, появление новой ледовой нагрузки делает ее доминирующей, то конструкцию надо усиливать, повышая стоимость ВЭС без увеличения вырабатываемой мощности. Подобное решение представляется сомнительным.

В табл. 1 указан полный перечень сопоставляемых конструкций.

В табл. 2 представлены основные параметры рассматриваемых ВЭС, используемые в дальнейшем для анализа.

Результаты расчетного анализа внешних нагрузок на ВЭУ

В рамках анализа были произведены вычисления опрокидывающего момента от действия ветра в различных режимах функционирования ВЭС, а также от воздействия расчетного поля ровного льда. Расчеты выполнялись для перечня ВЭС, указанных в табл. 1, и для различных глубин моря, на которых можно устанавливать стационарные ВЭС.

РИСУНОК 6 Зависимость опрокидывающего момента от ветровых и ледовых нагрузок на ВЭС с генератором мощностью 1,5 МВт

FIGURE 6 Dependence of the tilting moment on wind and ice loads in a wind power plant with a 1,5 MW generator

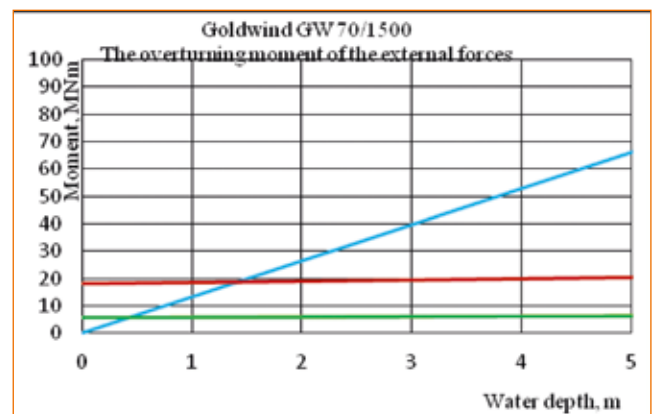


РИСУНОК 7 Зависимость опрокидывающего момента от ветровых и ледовых нагрузок на ВЭС с генератором мощностью 3,0 МВт

FIGURE 7 Dependence of the tilting moment on wind and ice loads in a wind power plant with a 3,0 MW generator

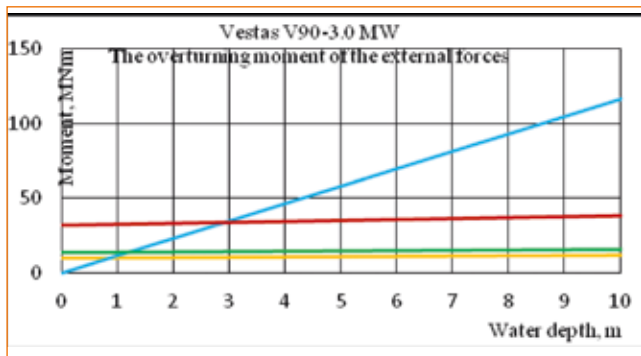
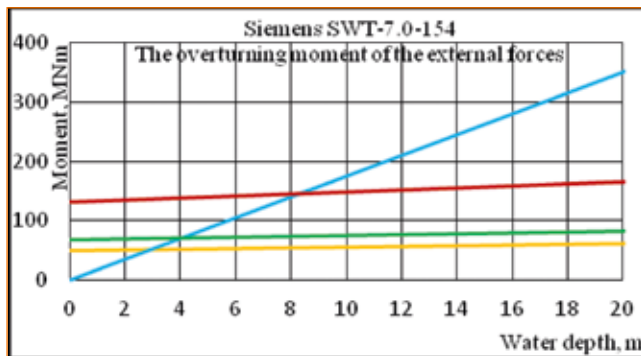


РИСУНОК 9 Зависимость опрокидывающего момента от ветровых и ледовых нагрузок на ВЭС с генератором мощностью 7,0 МВт

FIGURE 9 Dependence of the tilting moment on wind and ice loads in a wind power plant with a 7,0 MW generator



Скорость ветра в номинальном рабочем режиме принималась по техническим характеристикам ВЭС (12–13 м/с). Предельная скорость в рабочем режиме также соответствовала техническим характеристикам ВЭС (25 м/с). Максимальная штормовая скорость ветра, при которой ветроколесо ВЭУ останавливается, принималась за 50 м/с.

Ледяное поле считалось безграничным с толщиной 2,0 м и прочностью на сжатие 2,0 МПа.

Некоторые результаты расчетов опрокидывающего момента от ветровых и ледовых нагрузок на ВЭС с генераторами различной мощности при разных глубинах моря представлены на рис. 6–11. На них желтым цветом отображаются зависимости для ветрового опрокидывающего момента при рабочем режиме с максимальной скоростью ветра (25 м/с). Зеленый цвет используется для рабочего режима

РИСУНОК 8 Зависимость опрокидывающего момента от ветровых и ледовых нагрузок на ВЭС с генератором мощностью 5,0 МВт

FIGURE 8 Dependence of the tilting moment on wind and ice loads in a wind power plant with a 5,0 MW generator

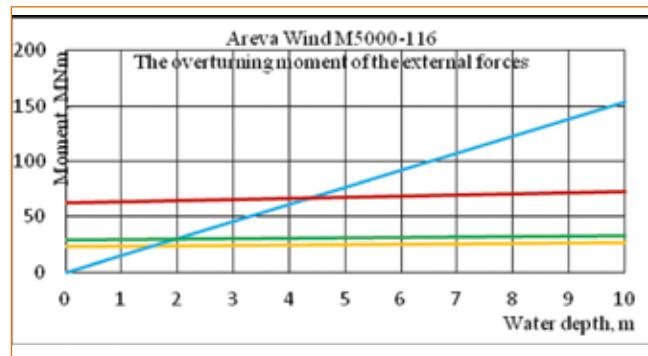
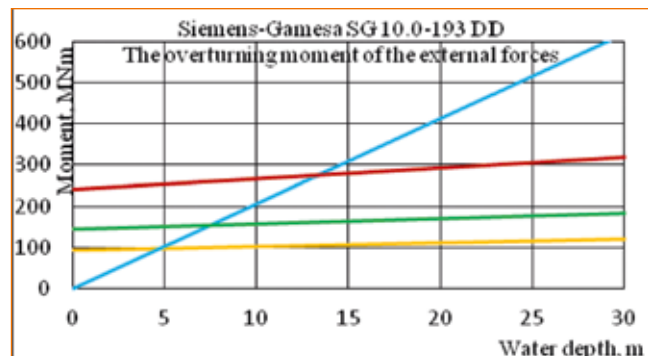


РИСУНОК 10 Зависимость опрокидывающего момента от ветровых и ледовых нагрузок на ВЭС с генератором мощностью 10 МВт

FIGURE 10 Dependence of the tilting moment on wind and ice loads in a wind power plant with a 10 MW generator



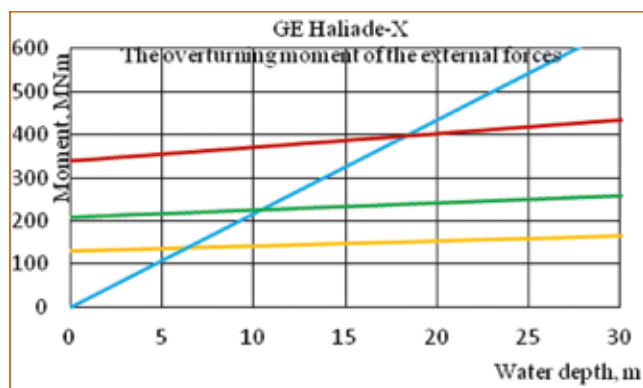
с номинальной скоростью (13 м/с), красный — для режима отстоя при штормовой скорости ветра (50 м/с). Синим цветом представлены зависимости для опрокидывающего момента от действия ледяного поля.

На рис. 12 представлен график зависимости максимальной глубины моря (H_{max}), при которой ледовые опрокидывающие моменты начинают превосходить ветровые, от мощности ВЭС. Он построен на основании выполненных расчетов. То есть путем определения глубины моря, при которой значение максимального ветрового опрокидывающего момента достигает значения ледового опрокидывающего момента.

Анализ приведенных результатов показывает, что при установке ВЭС с небольшой мощностью генератора (1–3 МВт) ледовые нагрузки на элементы конструкции будут доминировать. Это означает, что

РИСУНОК 11 Зависимость опрокидывающего момента от ветровых и ледовых нагрузок на ВЭС с генератором мощностью 12 МВт

FIGURE 11 Dependence of the tilting moment on wind and ice loads in a wind power plant with a 12 MW generator



потребуется более прочная конструкция, способная выдержать ледовое воздействие, повысить материалоемкость и стоимость ВЭС без увеличения полезной мощности. Возрастание цены на электроэнергию в этом случае ставит под сомнение целесообразность создания подобных ВЭС. Например, в российских зонах, где есть централизованное электроснабжение, обеспечиваемое мощностями атомных или гидроэлектростанций, такие ВЭС окажутся неконкурентоспособными. Однако в областях децентрализованного электроснабжения, где тарифы на электроэнергию повышаются в несколько раз, оценка конкурентоспособности требует специального рассмотрения.

Для наиболее мощных ВЭС (10–12 МВт) и вполне приемлемых для стационарных ВЭС глубин моря (10–20 м) можно ожидать, что установка опорных оснований на акватории арктических морей не потребует существенного укрепления конструкции и не приведет к значительному подорожанию вырабатываемой электроэнергии. Использование ВЭС с мощными генераторами в условиях арктических акваторий с экономической точки зрения представляется наиболее целесообразным.

ВЭС средней мощности (5–8 МВт) могут также применяться в арктических морях. Но в этом случае необходимо искать прибрежные акватории с небольшими глубинами, где опрокидывающие ледовые моменты не будут превалировать.

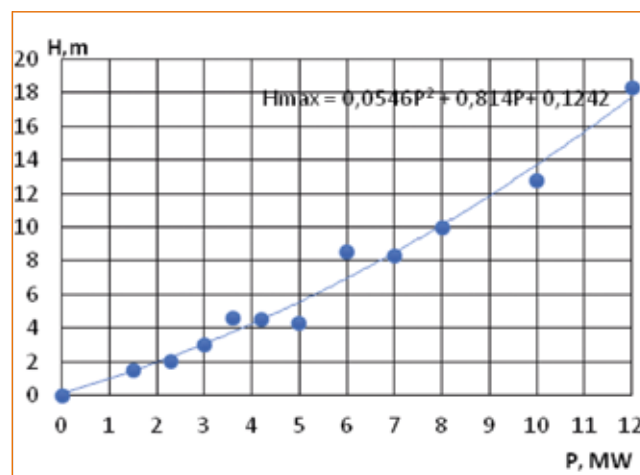
Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1) использование морских стационарных ВЭС в арктических условиях целесообразно для обеспечения электроэнергией зон децентрализованного электроснабжения со слаборазвитой промышленной инфраструктурой и сложными логистическими схемами поставки энергоносителей;

РИСУНОК 12 Зависимость максимальной глубины моря, при которой ветровые нагрузки превосходят ледовые, от мощности ВЭС

FIGURE 12 Dependence of maximum sea depth, up to which wind loads exceed ice loads, on WPP capacity



2) конструкции опорных оснований арктических ВЭС должны обеспечивать минимальные ледовые нагрузки и максимальную устойчивость. Минимизация ледовых воздействий достигается уменьшением характерных размеров сооружения на уровне ватерлинии. Этим требованиям отвечают конструкции в виде монопода, трипода и гравитационного типа. Повышение устойчивости обеспечивается разнесением по горизонтали точек опирания ВЭС и увеличением глубины забивки свай (для ВЭС со свайным раскреплением) или общей площади опирания для гравитационных оснований. Этим требованиям отвечают конструкции трехсвайного и гравитационного типа, а также в виде трипода. Одновременно условиям минимизации ледовой нагрузки и максимизации устойчивости подходят решения гравитационного типа и в виде трипода;

3) с точки зрения минимизации материалоемкости и стоимости арктических морских ВЭС при адаптации технических решений, апробированных на суше, предпочтительным вариантом является установка наиболее мощных ВЭС. В этом случае дополнительные издержки, связанные с воздействием на конструкции дополнительных ледовых нагрузок, окажутся минимальными, а цена вырабатываемой электроэнергии будет близка к сухопутным аналогам;

4) использование маломощных морских ВЭС в арктических условиях представляется проблематичным. Существенные расходы на усиление конструкции, связанное с противодействием ледовым нагрузкам, приведут к значительному повышению стоимости вырабатываемой электроэнергии;

5) для размещения морских ВЭС в арктических условиях необходимо искать акватории с наименьшими глубинами для минимизации опрокидывающих моментов, создаваемых воздействием ледовых образований.

Литература/References

1. Bolshev A.S., Elistratorov V.V., Panfilov A.A. et al. The investigation of conceptual approaches to the creation of marine ice-resistant floating wind power plant. Proceedings of the Twenty-Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference. 2019; 1: 429–434.
2. Global Offshore Wind Farm Database, 2019. <https://www.4coffshore.com/windfarms/>.
3. Bolshev A.S., Frolov S.A., Chernetsov V.A., Kupreev V.V. The design of substructures for offshore wind turbines. Journal Hydraulic Engineering. 2007; 5: 31–36.
4. Rules for the classification, construction and equipment of Mobile Offshore Drilling Units and Fixed Offshore Platforms. St. Petersburg: RMRS, 2018. 419 p.
5. ISO 19906. Petroleum and natural gas industry. Arctic offshore structures. 2010. 428 p.
6. Elistratov V.V. Renewable energy. 3rd edition. St. Petersburg: St. Petersburg Polytechnical University Publish House, 2016. 424 p.
7. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. 214 с. [Reference data on wind and wave regimes of the Barents, Okhotsk and Caspian Seas. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2003. 214 p. (In Russ.)].
8. Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2009. 356 p. [Reference data on wind and wave regimes of the Sea of Japan and the Kara Sea. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2009. 356 p. (In Russ.)].
9. The wind turbine GW 70/1500. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1203-goldwind-gw-70-1500>.
10. Siemens SWT-2.3–82. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/204-siemens-swt-2.3-82>.
11. Vestas Wind Systems A/S. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/247-vestas-v90-offshore>.
12. SWT-3.6–107 Offshore. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1272-siemens-swt-3.6-107-offshore>.
13. V117–4.2 MW. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1820-mhi-vestas-offshore-v117-4.2-mw>.
14. M5000–116. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/23-areva-m5000-116>.
15. GE Haliade 150–6MW. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1446-ge-general-electric-haliade-150-6mw>.
16. SWT-7.0–154. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1102-siemens-swt-7.0-154>.
17. V164–8.0 MW. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1419-mhi-vestas-offshore-v164-8.0-mw>.
18. SG 10.0–193 DD. URL: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-10-0-193-dd>.
19. Haliade-X 12 MW. URL: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>.

Вклад авторов. А.Е. Харсеев, А.С. Большев, С.А. Фролов, В.В. Елистратов, А.А. Панфилов: разработка дизайна исследования, изучение данных для анализа, обзор публикаций по теме статьи, статистический анализ полученных данных, написание текста рукописи.
Authors contributions. A.E. Kharseev, A.S. Bolshev, S.A. Frolov, V.V. Elistratov, A.A. Panfilov: development of research design, obtaining data for analysis, review of publications on the topic of the article, statistical analysis of the data obtained, paper writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declares no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.
Financing. The study was performed without external funding.

Статья поступила: 21.12.2021. **Принята к публикации:** 17.01.2022.
Article received: 21.12.2021. **Accepted for publication:** 17.01.2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Харсеев Александр Евгеньевич, руководитель группы технологического отдела АО «ГТ Морстрой». Адрес: 194354, г. Санкт-Петербург, ул. Есенина, д. 5б. Телефон: +7 (812) 296-30-06. E-mail: project@gtmorstroy.com.

Большев Александр Станиславович, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства*. Телефон: +7 (812) 297-59-54. E-mail: bolshev_as@spbstu.ru. ORCID: 0000-0002-0177-8389.

Фролов Сергей Анатольевич, доцент, к.т.н., доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства*. Телефон: +7 (812) 297-59-54. E-mail: frolov_sa@spbstu.ru.

Елистратов Виктор Васильевич, д.т.н., профессор, директор Научно-образовательного центра «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе», профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства*. Телефон: 8 (800) 707-18-99. E-mail: elistratov@spbstu.ru. ORCID: 0000-0001-7051-6027.

Панфилов Александр Алексеевич, к.т.н., доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства*. Телефон: 8 (800) 707-18-99. E-mail: apanfilov@spbstu.ru. ORCID: 0000-0002-7592-0712.

* Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

AUTHORS INFORMATION

Kharseev Alexander Evgenyevich, Head of group of technological department of GT Morstroy JSC. Address: 5b, Esenin St., St. Petersburg, 194354. Phone: +7 (812) 296-30-06. E-mail: project@gtmorstroy.com.

Bolshev Alexander Stanislavovich, DScTech, Senior Researcher, Professor of Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction. Phone: +7 (812) 297-59-54. E-mail: bolshev_as@spbstu.ru. ORCID: 0000-0002-0177-8389.

Frolov Sergey Anatolievich, Associate Professor, PhD in Technology, Associate Professor of Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering Construction*. Phone: +7 (812) 297-59-54. E-mail: frolov_sa@spbstu.ru

Elistratov Victor Vasilievich, DScTech, Professor, Director of the Scientific and Educational Center «Renewable Energy and Energy-Based Installations», Professor of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction*. Phone: 8 (800) 707-18-99. E-mail: elistratov@spbstu.ru. ORCID: 0000-0001-7051-6027.

Panfilov Aleksandr Alekseevich, PhD in Technology, Associate Professor of the Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering Construction. Phone: 8 (800) 707-18-99. E-mail: apanfilov@spbstu.ru. ORCID: 0000-0002-7592-0712.

* Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Address: 29, Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251.

УДК 621.315.6
 UDC 621.315.6

Самовосстанавливающиеся полимеры для силовых пленочных конденсаторов



Self-healing Polymers for Film Power Capacitors

АВТОРЫ

AUTHORS

Ю.В. Зайцев¹, д.т.н., профессор,
Д.М. Михайлов², к.т.н.,
Ю.М. Кривогуз³, к.т.н., доцент,
Д.Н. Петриев⁴,
А.Ю. Мирошниченко¹, к.ф.-м.н.,
Е.М. Торина¹, к.т.н.

Yu.V. Zaitsev¹, D.M. Mikhailov²,
Yu.M. Krivoguz³, D.N. Petriev⁴,
A.Yu. Miroshnichenko¹, E.M. Torina¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

² Филиал Института БРИКС по изучению сетей будущего, г. Шэньчжэнь, Китайская Народная Республика

³ Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

⁴ Московский институт электроники и математики имени А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

¹ National Research University «MPEI», Moscow, Russia

² China Branch of BRICS Institute for the Future of Network Technology, Shenzhen, People's Republic of China

³ The Institute of Mechanics of Metal-polymeric Systems named after V.A Bely, National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

⁴ Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

РЕЗЮМЕ

SUMMARY

В данной статье рассматриваются и анализируются диэлектрики-полимеры, для которых характерна способность восстанавливать свои функциональные характеристики (сопротивление изоляции, заданное значение емкости и т. п.) в случае локального пробоя на отдельном участке диэлектрической пленки. Последняя используется в качестве диэлектрика в конструкции силового конденсатора. Как показали исследования, указанным свойством обладают пленки полипропилена, полиэтилентерефталата, полиэтиленнафталата и полифениленсульфида. Они все более широко применяются для изоляции в проводах, кабелях и силовых пленочных конденсаторах.

Dielectric polymers are considered and analyzed herein. They are characterized by recovering their functional characteristics (insulation resistance, a given value of capacitance, etc.) in the event of a local breakdown in a separate section of the dielectric film, which is used as a dielectric in a power capacitor. As shown by studies, polypropylene, polyethylene terephthalate, polyethylene naphthalate and polyphenylene sulfide films, which are widely used for insulation in wires, cables and film power capacitors, have this property.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

KEYWORDS

ДИЭЛЕКТРИКИ, ПОЛИМЕРЫ, СПОСОБНОСТЬ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК, ЛОКАЛЬНЫЙ ПРОБОЙ, ПОЛИПРОПИЛЕН, ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ, ПОЛИЭТИЛЕННАФТАЛАТ, ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИД, СИЛОВЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

DIELECTRIC, POLYMERS, SELF-HEALING, LOCAL BREAKDOWN, POLYPROPYLENE, POLYETHYLENE TEREPHTHALATE, POLYETHYLENE NAPHTHALATE, POLYPHENYLENE SULFIDE, FILM POWER CAPACITORS

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

FOR CITATION

Зайцев Ю.В., Михайлов Д.М., Кривогуз Ю.М. и соавт. Самовосстанавливающиеся полимеры для силовых пленочных конденсаторов. Технический оппонент. 2022; 1 (8): 51–56.

Zaitsev Yu.V., Mikhailov D.M., Krivoguz Yu.M. et al. Self-healing polymers for film power capacitors. *Technicheskiy opponant* = *Technical Opponent*. 2022; 1 (8): 51–56.

Введение

Интенсивное развитие силовой электроники в новом тысячелетии и увеличение производства устройств компенсации реактивной мощности, в использовании которых заинтересованы не только компании — владельцы распределительных сетей, но и коммерческие структуры с активно эксплуатируемыми производственными мощностями, определили значительное повышение внимания к силовым пленочным конденсаторам. В основном это обусловлено их преимуществами, среди которых:

- низкие показатели эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) и коэффициента рассеяния (DF), практическое отсутствие деградации по значению диэлектрических потерь, а также минимальные потери мощности;
- полное отсутствие миграции металла электродов или выщелачивания по сравнению с керамическими конденсаторами при практически аналогичных диапазонах плотности энергии;
- уникальная способность самовосстановления при пробое благодаря быстрым сменам фазового и физического состояний полимера. Это повышает живучесть и долговечность эксплуатации пленочного конденсатора, конденсаторной батареи и всей установки компенсации реактивной мощности.

В настоящее время для конструкций силовых пленочных конденсаторов все более широко применяются полимеры, важной особенностью которых считается способность восстанавливать свои функциональные характеристики (сопротивление изоляции, заданное значение емкости и т. п.)

В сравнении с электролитическими конденсаторами пленочные обладают:

- более высокими рабочими напряжениями, скоростью разряда, плотностью энергии и рабочими температурами;
- более высокой надежностью и сроком службы, высокой стойкостью к тяжелым условиям эксплуатации (превышение заданных токов и напряжений, климатические особенности);
- меньшими потерями мощности.

Силовые конденсаторы находят все более широкое применение в установках управления и регулирования режимов электроэнергетических систем, в гибридных системах хранения электроэнергии, в механизмах рекуперации энергии электротранспорта, при создании бесперебойных систем электропитания для устройств различного функционального назначения.

Они перспективны и для выполнения энергоэффективных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии [1, 2, 3].

В России серия силовых пленочных конденсаторов выпускается Северо-Задонским конденсаторным заводом в исполнении УХЛ и В (всеклиматическом) по ОЖ0.461.100ТУ, а также народнохозяйственного назначения по ОЖ0.461.133ТУ. Они поставляются любыми партиями по наличию на складе с оперативной отгрузкой на заказ в течение 2–3 дней. Аналогичные конденсаторы выпускаются за рубежом — тайваньской фирмой JB Capacitors Company с заводами в Китае (г. Хэфэй провинции Аньхой, г. Наньтун провинции Цзянсу). В Европе немецкая компания Electronicon Kondensatoren GmbH является одним из ведущих производителей силовых пленочных конденсаторных установок, поставляя изделия по всему миру [4].

Несмотря на продолжающееся изготовление таких конденсаторов на базе металлизированной бумаги ввиду финансовой доступности материалов и довольно низких диэлектрических потерь в устройствах типа МР, а также типа МКВ (с металлизацией диэлектрика с двух сторон) и МРК (с металлизацией с одной стороны, содержит смешанный бумажно-полимерный диэлектрик Misch-Dielektrika), специалисты прогнозируют постепенный вывод бумаги из производства по причине ее гигроскопичности, склонности к деградации и необходимости осуществления дополнительной операции пропитки маслом, эпоксидной смолой и т. д. Все это повышает сложность и стоимость технологического процесса [5].

В настоящее время для конструкций силовых пленочных конденсаторов все более широко применяются полимеры, важной особенностью которых считается способность восстанавливать свои функциональные характеристики (сопротивление изоляции, заданное значение емкости и т. п.) в случае локального пробоя на каком-либо участке диэлектрической пленки, используемой в качестве изоляции в данном электротехническом изделии. Это свойство значительно увеличивает срок службы силовых конденсаторных установок. Указанная способность, как показали исследования, есть в различной степени у пленки стабилизированных полиолефинов, которые все более широко применяются для изоляции в силовых пленочных конденсаторах.

Цель данной статьи — представление и анализ численных характеристик, в том числе частотных свойств, различных полимеров, обладающих свойством самовосстановления и используемых в силовых пленочных конденсаторных установках.

Особенности силовых пленочных конденсаторов с функцией самовосстановления

Развитие технологий предъявляет все более серьезные требования к техническим характеристикам конденсаторов, связанным с увеличением количества запасаемой энергии, ресурса, электри-

ческой прочности диэлектриков, рабочей частоты конденсаторов, снижением потерь и параметров паразитных элементов.

Одним из основных свойств конденсаторной установки является удельная плотность запасаемой энергии, которая прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости и квадрату напряженности электрического поля. Рассматриваемые полимеры имеют сравнительно небольшие значения диэлектрической проницаемости (табл. 1). Поэтому для достижения приемлемых уровней плотности запасаемой энергии силовым конденсаторам, использующим полимерные материалы, необходимо выдерживать довольно большие значения напряженности электрического поля диэлектрика. Поверхность конденсаторной пленки имеет дефекты. Из-за них после напыления слоя металлизации наблюдается неоднородность электрического поля в диэлектрике конденсатора. Это при определенных условиях может приводить к локальным разогревам и пробоям конденсаторной установки. В полимерных материалах, которые обладают свойством самовосстановления, пробой, сопровождающийся резким локальным увеличением температуры и давления, вызывает переход диэлектрика в вязкотекучее состояние и изоляцию зоны дефекта. Далее конденсатор продолжает работу с незначительной потерей емкости.

Отметим, что способность к самовосстановлению при локальном пробое электрода (за счет расплавления электрической дуги и перехода в вязкотекучее состояние полимера-диэлектрика, «обволакивания» и изоляции поврежденного участка электрода застывшим полимером) характерна только для металлизированных пленочных конденсаторных установок с толщиной металлизированного слоя не более 3/10 толщины диэлектрика. Причем в причинах пробоев к пленочным фольговым конденсаторам при пробое вероятность сваривания электродов-слоев фольги довольно высока. Поэтому самовосстановление в фольгово-металлизированных пленочных конденсаторных установках считается условным. Оно зависит от конструктивных особенностей конденсатора и его рабочих характеристик.

Для силовых пленочных конденсаторных установок характерны следующие ярко выраженные особенности:

- любой локальный пробой в установке снижает ее емкость в среднем на 0,1%. Риски провоцирования локальным повреждением лавинообразных пробоев зависят от толщины диэлектрика в конденсаторе, поскольку в процессе образования плазмы на первом этапе «самозаживления» прилегающие слои диэлектрика повреждаются и изменяют свои свойства;
- в результате фазовых и физических переходов полимера при самовосстановлении повышается внутреннее давление в корпусе конденсаторной установки, а при определенном числе пробоев оно достигает критических значений. Это вызывает срабатывание предохранительных вставок (при их наличии), разрыв или повреждение корпуса;
- увеличение температуры внутри конденсатора на каждые десять градусов относительно рабочей, а также превышение рабочего напряжения на за-

жимах на каждые 10% в среднем вдвое уменьшает реальную долговечность пленочных металлизированных конденсаторных установок;

- полимерная пленка-диэлектрик стабильна в большом диапазоне температур и давлений, не склонна к диэлектрической диссипации, деградации материала, имеет небольшой удельный вес и высокую технологичность. Все это позволяет формировать силовые пленочные конденсаторные установки при компактных размерах и малом весе.

Следует отметить, что исследования силовых конденсаторов с функцией самовосстановления активно ведутся рядом авторов в различных направлениях. Одно из них связано с конструкцией электродов конденсаторной установки. Учитывая, что процесс развития пробоя и самовосстановления протекает довольно быстро (несколько миллисекунд), вся энергия может не успеть рассеяться в области самовосстановления, следовательно, разрушение распространится на соседние витки обкладок. И это послужит причиной обширного пробоя и выхода конденсатора из строя. Риски провоцирования локальным пробоем лавинообразных пробоев зависят от толщины диэлектрика в конденсаторной установке, поскольку в процессе образования плазмы на первом этапе «самозаживления» прилегающие слои диэлектрика повреждаются и изменяют свои характеристики от конструкции электродов. Поэтому полностью реализовать функцию самовосстановления возможно только при их адаптации (например, защитная система Internally Protected Elements (IPE) или сегментирование поверхности электрода).

Другим направлением является исследование свойств полимеров со способностью к самовосстановлению. Их использование позволяет в значительной степени варьировать стоимость, размеры и технические свойства изготавливаемых конденсаторов. Ниже представлен сравнительный анализ ряда полимеров-диэлектриков по различным характеристикам.

Полимерные пленки-диэлектрики для силовых конденсаторов

В конструкциях силовых конденсаторов применяют такие диэлектрики, как полипропилен (polypropylene — PP), полиэтилентерефталат (polyethyleneterephthalate — PET; у полимерщиков эта аббревиатура подразумевает полиэтилентерефталат), полиэтиленнафталат (polyethylenenaphthalate — PEN), поликарбонат (polycarbonate — PC), полифениленсульфид (polyphenylenesulfide — PPS), полиимид (polyimide — PI), поливинилиденфторид (polyvinylidene fluoride — PVDF). Наиболее широко используемыми в настоящее время стали PP, PET, PEN и PPS. Характеристики указанных полимеров-диэлектриков и пленочных конденсаторов на их основе приведены в табл. 1, 2. Для усовершенствования свойств полимеров их структура продолжает оптимизироваться, поэтому в дальнейшем, с развитием технологий, ука-

ТАБЛИЦА 1 Характеристики ряда полимеров-диэлектриков и конденсаторов на их основе

TABLE 1 Characteristics of some dielectric polymers and capacitors based on them

Характеристики диэлектриков Dielectric characteristics		Полимер Polymer			
		PET	PEN	PPS	PP
Минимально допустимая толщина пленки, мкм Minimum permissible film thickness, μm		0,7	0,9	1,2	3,0
Поглощение влаги (гигроскопичность), % Moisture absorption (hygroscopicity), %		Низкое Low	0,4	0,05	<0,1
Номинальное напряжение (постоянный ток), В Rated voltage (direct current), V		50–1 000	16–250	16–100	40–2 000
Типовой диапазон емкости Typical capacity range		100 пФ — 22 мкФ 100 pF — 22 μF	100 пФ — 1 мкФ 100 pF — 1 μF	100 пФ — 0,47 мкФ 100 pF — 0,47 μF	100 пФ — 10 мкФ 100 pF — 10 μF
$\Delta C/C$ в диапазоне температур, % $\Delta C/C$ over the temperature range, %		± 5	± 5	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$
Тангенс угла диэлектрических потерь ($\times 10^{-4}$) для частот Tangent of the dissipation angle ($\times 10^{-4}$) for frequencies	при 1 кГц at 1 kHz	50–100	42–80	2–15	1–5
	при 10 кГц at 10 kHz	110–150	54–150	2,5–25	2–8
	при 100 кГц at 100 kHz	170–300	12–300	12–60	2–25
	при 1 МГц at 1 MHz	200–350	–	18–70	4–40
Постоянная времени $R_{\text{iso}}C$, сек. Time constant $R_{\text{iso}}C$, sec.	при 25 °C at 25 °C	$\geq 10\,000$	$\geq 10\,000$	$\geq 10\,000$	$\geq 100\,000$
	при 85 °C at 85 °C	1 000	1 000	1 000	10 000
Диэлектрическая абсорбция, % Dielectric absorption, %		0,2–0,5	1–1,2	0,05–0,1	0,01–0,1
Макс. спец. емкость, нФ*В/мм ³ Max. capacitance, nF*V/mm ³		400	250	140	50
Стоимость Cost		Средняя Medium	Высокая High	Высокая High	Низкая Low

занные в таблицах значения полимеров, возможно, будут улучшены [5].

Пленочные конденсаторы на основе полипропилена и полиэстера могут работать при высоких напряжениях, имеют значительные величины напряжения пробоя. Их отличают низкие диэлектрические потери, хорошая частотная характеристика, отличная самовосстанавливающаяся способность.

Каждый материал имеет свои преимущества и недостатки. Отметим наиболее значимые.

Из табл. 1, 2 видно, что PP обладает наименьшей диэлектрической проницаемостью, но наибольшей электрической прочностью, что позволяет конденсаторам на основе этого материала иметь приемлемые уровни плотности энергии. Несмотря на то

что PP является наихудшим по ряду показателей (максимальная температура, минимально допустимая ширина пленки и т. д.), он остается достаточно широко применимым, так как сочетает хорошие электрические свойства и низкую стоимость [6].

Наибольшая максимальная температура и наименьшая девиация емкости в диапазоне рабочих температур делают использование PPS довольно перспективным, но целесообразным не для всех приложений. Причины — высокая стоимость и достаточно большие значения минимально допустимой ширины пленки и коэффициента рассеяния.

Для конденсаторов на базе пленок из PET и PC характерны средние показатели плотности энергии и электрической прочности. Однако у них повышенные

ТАБЛИЦА 2 Характеристики пленочных конденсаторов с различными диэлектриками-полимерами

TABLE 2 Characteristics of film capacitors with different dielectric polymers

Диэлектрик Dielectric	Диэлектрическая проницаемость при 1 кГц Dielectric capacitance at 1 kHz	Электрическая прочность, В/мкм Electrical strength, V/μm	Макс. рабочая температура, °С Max. operating temperature, °C	Плотность энергии, Дж/см ³ Energy density, J/cm ³	
				Теоретич. Theoretical	Практич. Practical
PC	2,8	350	150	3,6	0,5–1
PP	2,2	500	105	4,1	1–1,5
PET	3,3	400	125	4,9	1–1,5
PEN	3,2	400	135	4,4	1–1,5
PPS	3,0	360	200	4,1	1–1,5

ТАБЛИЦА 3 Диэлектрическая проницаемость ряда полимеров, используемых в силовых конденсаторах, на различных частотах (от 100 Гц до 1 МГц)

TABLE 3 Dielectric permittivity of some polymers used in power capacitors at different frequencies (from 100 Hz to 1 MHz)

Тип диэлектрика Type of dielectric	Диэлектрическая константа при частоте, Гц Dielectric constant at frequency, Hz				
	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
PC	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7
PP	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
PET	3,3	3,3	3,2	3,2	3,2
PVDF	12,0	11,0	10,2	9,6	7,0
PEN	3,2	3,1	3,0	3,0	3,0
PPS	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
PI	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

значения коэффициента рассеяния. Применение PET потенциально имеет технологическое преимущество перед другими полимерами, так как, являясь средним по стоимости материалом, теоретически позволяет добиться наибольшего значения плотности энергии.

Особый интерес представляют также частотные свойства материалов. В табл. 3 приведены данные о диэлектрической проницаемости полимеров для силовых конденсаторов на различных частотах (от 100 Гц до 1 МГц).

Из табл. 3 следует, что наиболее стабильна диэлектрическая постоянная при изменении рабочей частоты для PP, PPS, PI. Материалы PC, PET и PEN имеют среднюю стабильность. Наихудшим по данному показателю является PVDF. Тем не менее именно

этот материал обладает наибольшим значением диэлектрической константы.

Заключение

В статье рассматривается актуальность исследования силовых пленочных конденсаторов с диэлектриками, обладающими свойством самовосстановления. Указаны основные особенности таких конденсаторных установок и типы полимеров, используемых в них в качестве диэлектриков. Приведены таблицы значений различных параметров для ряда самовосстанавливающихся полимеров. Показано, что по значению практически достижимого на данный момент уровня плотности

энергии большинство материалов равнозначно, но по другим характеристикам каждый из них имеет свои преимущества и может быть использован в зависимости от требований, предъявляемых к устройству в конкретном приложении. Также в таблицах представлены данные, позволяющие

анализировать частотные свойства конденсаторов на основе различных полимеров. Показано, что значение диэлектрической постоянной для разных материалов может варьироваться или оставаться постоянным при изменении частоты в широком диапазоне.

Литература/References

1. Стребков Д.С. Перспективы создания глобальной солнечной энергосистемы. Технический оппонент. 2018; 1 (1): 14–23. [Strebkov D.S. Prospects of creation of the global solar power system. Tekhnicheskiy opponent = Technical Opponent. 2018; 1 (1): 14–23. (In Russ.).]
2. Григораш О.В., Пигарев К.В., Ивановский О.Я., Туаев А.С. Концепция построения энергоэффективных систем электроснабжения. Технический оппонент. 2018; 1 (1): 40–45. [Grigorash O.V., Pigarev K.V., Ivanovsky O.Ya., TuaeV A.S. The design concept of energy-efficient power supply systems. Tekhnicheskiy opponent = Technical Opponent. 2018; 1 (1): 40–45. (In Russ.).]
3. Амерханов Р.А., Кириченко А.С., Армагания Э.Г., Дворный В.В. Проблемы использования возобновляемых источников энергии. Технический оппонент. 2018; 1 (1): 46–53. [Amerkhanov R.A., Kirichenko A.S., Armaganyan E.G., Dvornyy V.V. Problems of renewable energy sources application. Tekhnicheskiy opponent = Technical Opponent. 2018; 1 (1): 46–53. (In Russ.).]
4. Зайцев Ю.В., Холодный Д.С., Рыбаков Д.А. Материалы и элементы компьютерной техники. М.: Издательство Научного управления Объединенной академии образовательных учреждений, 2014. 146 с. [Zaitsev Yu.V., Kholodny D.S., Rybakov D.A. Materials and elements of computer equipment. Moscow: Publishing house of the Science Department of the United Academy of Educational Institutions, 2014. 146 p. (In Russ.).]
5. Силовые и прецизионные полистирольные конденсаторы К7 (высоковольтные пленочные). Рекламные издания. Северо-Задонский конденсаторный завод, 2018–2020. [Power and precision polystyrene capacitors K7 (high-voltage film ones). Advertising publication. North-Zadonsk Capacitor Plant. 2018–2020. (In Russ.).]
6. Зайцев Ю.В., Холодный Д.С., Мирошниченко А.Ю. Материалы и элементы электронной техники. Издательство LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland, 2017. [Zaitsev Yu.V., Kholodny D.S., Miroshnichenko A.Yu. Materials and elements of computer equipment. Publishing house of LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland, 2017. (In Russ.).]

Вклад авторов. Ю.В. Зайцев, Д.М. Михайлов, Ю.М. Кривогуз, Д.Н. Петриев, А.Ю. Мирошниченко, Е.М. Торина: разработка дизайна исследования, изучение данных для анализа, обзор публикаций по теме статьи, статистический анализ полученных данных, написание текста рукописи.
Authors contributions. Yu.V. Zaitsev, D.M. Mikhailov, Yu.M. Krivoguz, D.N. Petriev, A.Yu. Miroshnichenko, E.M. Torina: development of research design, obtaining data for analysis, review of publications on the topic of the article, statistical analysis of the data obtained, paper writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declares no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.
Financing. The study was performed without external funding.

Статья поступила: 23.12.2021. **Принята к публикации:** 19.01.2022.
Article received: 23.12.2021. **Accepted for publication:** 19.01.2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зайцев Юлий Владимирович, профессор, д.т.н., профессор кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов, Национальный исследовательский университет «МЭИ»*.

Михайлов Дмитрий Михайлович, к.т.н., иностранный эксперт сектора разработки, филиал Института БРИКС по изучению сетей будущего (г. Шэньчжэнь, Китайская Народная Республика). Телефон: +7 (915) 353-92-85. E-mail: mikhaylovdm@bifnc.cn.

Кривогуз Юрий Михайлович, к.т.н., доцент, заведующий сектором «Реакционная экструзия», Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси. Адрес: 246050, г. Гомель, ул. Кирова, д. 32а. Телефон: +375 (232) 34-06-38. E-mail: krivoguz@mpri.org.by.

Петриев Дмитрий Николаевич, аспирант, Московский институт электроники и математики имени А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Адрес: 123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34. Телефон: +7 (495) 916-88-29. E-mail: miem@hse.ru.

Мирошниченко Антон Юрьевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов, Национальный исследовательский университет «МЭИ»*.

Торина Елена Михайловна, к.т.н., доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов, Национальный исследовательский университет «МЭИ»*.

* Адрес 11250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. Телефон: +7 (495) 362-75-60. E-mail: universe@mpei.ac.ru.

AUTHORS INFORMATION

Zaitsev Yuliy Vladimirovich, Professor, DScTech, Professor, Department of Physics and Technology of Electrical Materials and Components, National Research University «MPEI»*.

Mikhailov Dmitry Mikhailovich, PhD in Technology, Foreign Expert in the development sector, China Branch of BRICS Institute for the Future of Network Technology (Shenzhen, People's Republic of China). Phone: +7 (915) 353-92-85. E-mail: mikhaylovdm@bifnc.cn.

Krivoguz Yuri Mikhailovich, PhD in Technology, Associate Professor, Head of the Department «Reaction Extrusion», The Institute of Mechanics of Metal-polymeric Systems named after V.A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus. Address: 32a Kirov St., Gomel, 246050. Phone: +375 (232) 34-06-38. E-mail: krivoguz@mpri.org.by.

Petriev Dmitry Nikolaevich, graduate student, A.N. Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics. Address: 34 Tallinskaya St., Moscow, 123458. Phone: +7 (495) 916-88-29. E-mail: miem@hse.ru.

Miroshnichenko Anton Yuryevich, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Physics and Technology of Electrical Materials and Components, National Research University «MPEI»*.

Torina Elena Mikhailovna, PhD in Technology, Associate Professor, Department of Radio Signal Generation and Processing, National Research University «MPEI»*.

* Address: 14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, Russia, 11250. Phone: +7 (495) 362-75-60. E-mail: universe@mpei.ac.ru.

УДК 621.865.8
 UDC 621.865.8

Методы управления сложными объектами: история



Methods of Complex Objects Management: History

АВТОРЫ

AUTHORS

**А.В. Спиридонов¹,
И.В. Деревяшкин^{2,3}, д.т.н., профессор,
В.П. Спиридонов⁴, к.т.н., профессор**

**A.V. Spiridonov¹,
I.V. Derevyashkin^{2,3},
V.P. Spiridonov⁴**

¹ Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, г. Москва, Россия

² Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

³ Филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Губкин, Россия

⁴ Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Россия

¹ State Scientific Research Institute of Instrumentation, Moscow, Russia

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

³ National University of Science and Technology «MISIS», Gubkin, Russia

⁴ Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

РЕЗЮМЕ

SUMMARY

В материале рассматривается истории развития. Представлены основные примеры создания механизмов, андроидов, роботов, автоматических устройств и промышленных объектов управления. Описаны воздействия научно-технических достижений на повседневную жизнь человека, которые в настоящее время необходимо осмысливать. Невозможно остановить развитие робототехники и интеллектуальных алгоритмов управления, и желающим быть в авангарде мировой промышленности приходится это принимать и догонять.

The article reviews the history of development of technologies. The main examples of the creation of mechanisms, androids, robots, automatic devices and industrial control objects are presented. The impacts of scientific and technological advances on daily human life which nowadays need to be comprehended are described. It is impossible to stop the development of robotics and intelligent control algorithms, and those wishing to be at the forefront of global industry have to accept this and catch up.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

KEYWORDS

ИСТОРИЯ РОБОТОТЕХНИКИ, АВТОМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА, АНДРОИДЫ, РОБОТЫ, СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, МЕХАНИЗМЫ

HISTORY OF ROBOTICS, AUTOMATIC DEVICES, ANDROIDS, ROBOTS, CONTROL SYSTEMS, MECHANISMS

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

FOR CITATION

Спиридонов А.В., Деревяшкин И.В., Спиридонов В.П. Методы управления сложными объектами: история. Технический оппонент. 2021; 1 (8): 57–64.

Spiridonov A.V., Derevyashkin I.V., Spiridonov V.P. Methods of complex objects management: history. *Technicheskiy opponant = Technical Opponent*. 2019; 1 (8): 57–64.

Введение

Робототехника — сравнительно молодая наука, однако история насчитывает тысячелетия. С одной стороны, люди давно нуждались в помощниках, способных взять на себя тяжелую, опасную и монотонную работу. С другой, механизмы предназначались и для развлечения.

В этих разных направлениях и развивалась сложная, но в то же время увлекательная отрасль знаний,

опирающаяся на открытия во всех естественных и технических науках. Не последняя роль в становлении робототехники принадлежит информационным технологиям. Важны также наличие простейших подобий органов чувств и системы обратной связи с тем, кто управляет механизмом. Но без достижений в области механики о робототехнике было бы сложно говорить.

История использования промышленных вариантов манипуляционных и транспортных роботов играет особую роль в создании управления сложными объ-

ектами в разных отраслях промышленности. В 1980–1990-х годах наблюдались примеры непромышленного применения манипуляционных автоматизированных устройств, в том числе в космосе и медицине.

В последнее время появился новый класс робототехнических систем (РТС) — это роботы специального назначения (РСН). Создание РСН в большей степени связано с аварией, произошедшей на Чернобыльской атомной электростанции (АЭС) в 1986 году. Привлечение людей к дезактивации зараженных территорий привело к заражению и возникновению последующих болезней у значительного числа работников. В то время, к сожалению, ни у нас, ни за рубежом не было роботов и робототехнических систем, способных осуществлять сбор и утилизацию радиоактивных отходов без непосредственного участия персонала. Подобные РТС, созданные позднее, стали важным элементом системы обеспечения безопасности на АЭС. Спустя время такие роботы начали использоваться специалистами по чрезвычайным ситуациям (ЧС) для ликвидации последствий ЧС стихийного и техногенного характера.

Особенность всех видов РСН заключается в том, что все необходимые операции выполняются ими без непосредственного участия людей. В некоторых случаях человек может осуществлять дистанционное управление РСН, однако он не подвергает себя опасности во время воздействия поражающих факторов [1–5].

Создание методов управления: исторические аспекты

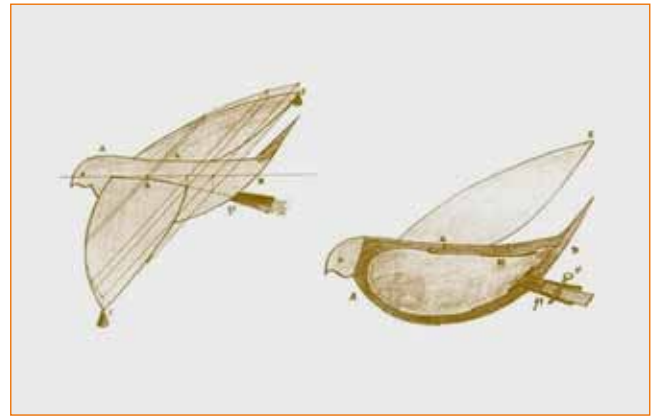
Известно, что еще в античности были созданы отдельные образцы устройств, которые могли действовать автоматически, т. е. без непосредственного участия человека. Однако большинство из них не имело практического значения.

Приведем важный исторический пример описания возможностей таких механических помощников, которое было дано великим древнегреческим поэтом Гомером в произведении «Илиада». Ниже можно ознакомиться с двумя фрагментами (песнь восемнадцатая) в переводе Н. Гнедича.

*«Бога, покрытого потом, находит в трудах,
 пред мехами
 Быстро вращавшегося: двадцать треножников
 вдруг он работав,
 В утварь поставит к стене своего
 благолепного дома.
 Он под подножием их золотые колеса устроил,
 Сами б собою они приближались к сонму
 бессмертных,
 Сами б собою и в дом возвращались, взорам на
 диво».*
*«Ризою оделся и, толстым железом подпираясь,
 в двери
 Вышел хромая; прислужницы, под руку взявши
 владыку,
 Шли золотые, живым подобные девам
 прекрасным,
 Кои исполнены разумом, силу имеют и голос,
 И которых бессмертные знанию дел изучили».*

РИСУНОК 1 Деревянный голубь — первый робот

FIGURE 1 Wooden pigeon — the first robot



Дадим пояснения к приведенным отрывкам. Эта песнь «Илиады» содержит описание визита богини Фетиды (матери греческого героя Ахиллеса) к Гефесту, богу огня и кузнечного искусства, с просьбой изготовить волшебные доспехи для своего воинственного сына.

В первом фрагменте дано описание процесса создания автоматически передвигающихся транспортных роботов (треножников с золотыми колесами). Во втором — Гефеста сопровождают антропоморфные роботы, наделенные искусственным интеллектом (ИИ) и способностью речевого обмена информацией (золотые прислужницы). Поэтому стоит вспомнить об инженерах далекого прошлого [6, 7].

По мнению многих историков технологий, самый первый робот — это деревянный голубь, который запускался в небо посредством паровой катапульты. Предположим, что он двигался с помощью пара и был способен летать. Этого голубя изобрел Архит Тарентский еще в V веке до н. э. (рис. 1).

Архимед был известен как создатель автоматических механизмов. Предполагается, что он сделал первый прообраз настоящего боевого робота. Устройство под названием «коготь», которое устанавливалось на крепостной стене, захватывало длинным крюком осаждавшие город римские корабли, поднимало их в воздух и переворачивало, чтобы экипаж остался за бортом.

Греческий математик и механик Герон Александрийский создал автоматические дозаторы жидкости и многоступенчатые фонтаны и водоемы, смастерил самоходную тележку, передвигавшуюся по заданной траектории благодаря системе из тросов и кольшков.

Механические чудеса явили миру не только выдающиеся ученые Западной Европы. Персидские братья Бану Муса собрали свыше сотни разнообразных устройств. Аль-Маради (XI век) и аль-Джазари (XIII век) написали труды о конструировании машин и тоже являлись создателями многих поразительных приспособлений. А согласно неподтвержденным сведениям, умелые механики сделали для Ивана Грозного «железного мужика».

История робототехники в древности изобилует упоминаниями о статуях богов с движущимися головами и руками: в Китае, Вавилоне, Египте такие

творения приводили зрителей в трепет. Наука тесно переплеталась с религией, хотя цели их были разные.

Средние века — самый длинный период в истории робототехники, когда знания тщательно документировались. Поэтому до наших дней дошли многочисленные чертежи и описания. В те времена появились более эффективные механизмы — пружинный и маятниковый, а размеры автоматов уменьшились.

Андрониды, которых создали Пьер Жак и Анри Дро, не только двигались, а писали, рисовали и играли музыку [8].

Часы Ивана Кулибина соперничали с творениями его европейских коллег: они и отсчитывали время, и показывали мини-спектакли, и воспроизводили заложенные в них мелодии.

На закате эпохи Средневековья Леонардо да Винчи являл собой пример исторической личности, ассоциирующейся в массовом сознании с образом «мага от науки». В своих зарисовках изобретатель предложил схемы разных механизмов, в том числе фигуры закованного в латы рыцаря, который может двигать руками и шеей, садиться и даже открывать рот (рис. 2).

Такая тенденция сохранилась: каждое новое поколение машин становится меньше, энергию расходует экономнее, а работает дольше [9–12].

Во время промышленного переворота, на рубеже XVIII–XIX веков, в Европе начинается новый этап развития автоматизации, связанный с ее внедрением в производство. Первым объектом управления была паровая машина. Первым промышленным автоматическим устройством являлся регулятор уровня ее котла, созданный И.И. Ползуновым в 1765 году. Как, впрочем, и регулятор скорости паровой машины Дж. Уатта (1784). Появление последней привело к созданию паровозов (Р. Тревитик и Дж. Стефенсон) и пароходов (Р. Фултон).

В 1760-х на Змеиногорском руднике Козьма Дмитриевич Фролов построил четыре огромных устройства для толчения и промывки руды, которые работали без применения лошадиной или человеческой силы. Вода из реки Корболихи размельчала добытую породу, промывала ее, наполняла тележки, перевозила их дальше, опустошала в специальный резервуар и возвращала порожними обратно. Механизм был подобен конвейеру, до изобретения которого оставалось 150 лет!

Наблюдалась колоссальная экономия, а добыча золота и серебра росла в геометрической прогрессии. Однако К.Д. Фролов мечтал о большей автоматизации процесса. После десятилетия споров и согласований и такого же периода упорного труда на Змеиногорском заводе возвели плотину высотой 18 метров и водохранилище. Из последнего канал уходил под землю, где находился целый механический мир (рис. 3).

Модель Змеиногорского завода представлена в Алтайском краеведческом музее. Так, разветвленная сеть русел питала кузницу, лесопилку, несколько рудообогатительных механизмов, а далее соединялась в один поток, который направлялся на расположенное под землей колесо машины, поднимавшей породу и позволявшей доставать с глубины 100 метров до 10 тысяч пудов за смену!

На этом чуде не прекращались: отработавшая на Преображенской шахте вода направлялась в Екатерининскую. Там она крутила другую рудоподъемную

РИСУНОК 2 Фигура рыцаря, закованного в латы

FIGURE 2 Figure of a knight clad in armor



машину, поменьше, и шла на колоссальное колесо диаметром 17 метров, которое позволяло системе насосов откачивать жидкость с глубины более 200 метров. После вода направлялась в Вознесенскую шахту с так называемым «слоновым» колесом (15 метров). Там процесс повторялся.

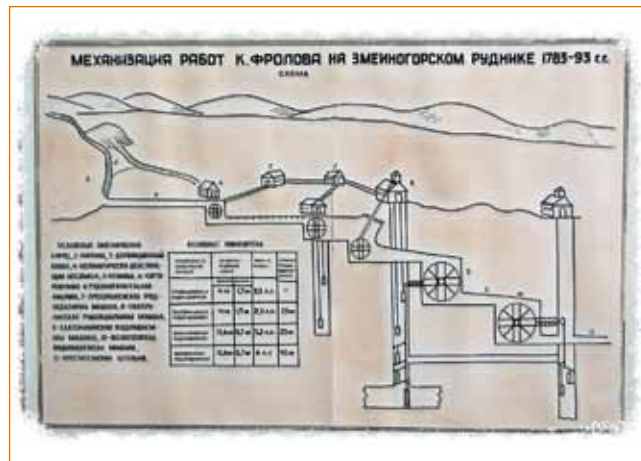
Вода, взятая из Корболихи, проходила под землей свыше двух километров и возвращалась в реку, давая жизнь семи большим и нескольким десяткам маленьких механизмов. Это был настоящий подземный мир, его устройством восхитились бы даже гномы Эребора [13–15]!

Со второй половины XIX века существенную роль в развитии регуляторов играют потребности в электрическом освещении.

А.И. Шпаковскому удалось разработать регулятор электродуговых ламп. В устройствах В.Н. Чиколева впервые применялся электрический двигатель. В них совмещены принципы регулирования по отклонению

РИСУНОК 3 Змеиногорский рудник

FIGURE 3 Zmeinogorsk mine



Примечание/Note. МЕХАНИЗАЦИЯ РАБОТ К. ФРОЛОВА НА ЗМЕИНОГОРСКОМ РУДНИКЕ 1783–1793 гг. — MECHANIZATION OF WORK BY K. FROLOV AT THE ZMEINOGORSK MINE IN 1783–1793.

регулируемой величины и по возмущающему воздействию.

В 1845 году братья Сименс предложили осуществлять воздействие на регулируемый объект в функции производной отклонения регулируемой величины.

В 1877 году А.П. Давыдов разработал проект первой следящей системы, содержащей электрические элементы. В 1881 году он показал действующий макет этого изобретения, предназначенного для того, чтобы автоматически придавать орудиям надлежащий угол возвышения согласно изменению расстояния до цели.

Параллельно с разработкой новых аппаратных средств для систем регулирования происходило теоретическое осмысление происходящих в них процессов.

В одних работах регулятор рассматривали отдельно от машины. Это позволяло рассчитать его как механизм. Но не давало представления о том, как он будет функционировать в соединении с машиной. В других работах регулятор и машина рассматривались совместно, однако первый считался идеальным, безынерционным, в результате чего система оказывалась устойчивой. Но практики уже тогда знали, что это далеко не всегда соответствовало действительности. Данное обстоятельство и заинтересовало крупнейшего английского физика Дж.К. Максвелла. В 1868 году в работе «О регуляторах» он впервые поставил и рассмотрел математическую задачу, связанную с устойчивостью системы регулирования. Это переход к исследованию малых отклонений и линеаризация дифференциальных уравнений, совместное рассмотрение уравнений регулятора и машины, формулировка условий устойчивости линейных систем третьего порядка и нахождение условий устойчивости для уравнений произвольного порядка. В то же время инженеры тех времен признали, что первым создал теорию автоматического регулирования не Максвелл, а русский ученый И.А. Вышнеградский. Работа английского физика осталась практически без их внимания. Это объясняется тем, что технические выводы Максвелла являлись далеко не бесспорными и в целом не представляли практического интереса, не отвечали на самые острые вопросы, касающиеся техники тех лет, и даже иногда неправильно ориентировали инженеров, которые захотели бы ими воспользоваться. Самой распространенной в промышленности в те годы признавалась паровая машина, почти (или совсем) лишенная свойства самовыравнивания. Максвелл указывал на управление такими устройствами с помощью астатических регуляторов, отказав статическим даже в названии. Ошибочность этого подхода определил И.А. Вышнеградский. В трудах Парижской академии (1876), а также в России (1878) ученый опубликовал статьи «Об общей теории регуляторов» и «О регуляторах прямого действия». В них были описаны основные этапы работы Максвелла (системный подход, линеаризация, исследование устойчивости). Кроме того, делался существенный шаг вперед при рассмотрении некоторых основных показателей качества процесса регулирования. Это монотонность, колебательность, аperiodичность. И.А. Вышнеградский построил диаграммы для этих показателей и вывел известные формулы, которые послужили основой для расчета и наладки систем регулирования и выражали условия устойчивости через основные параметры

машины и регулятора. Более того, он сформулировал классические тезисы. «Без неравномерности нет регулятора», «без катаракта нет регулятора» — данные утверждения прекратили бесплодные поиски конструкций «идеальных» астатических устройств для паровых машин. Сегодня эти тезисы устарели, потеряв общность. Ведь в технике стали широко использоваться машины с существенным самовыравниванием (электрические) и более сложные объекты. Но в то время вышеуказанные утверждения открыли эпоху. Причем для регулирования машин без самовыравнивания (паровых, дизелей) они сохраняют значение и сейчас. И.А. Вышнеградский в своих работах вскрыл и объяснил знаменитое противоречие между точностью и устойчивостью регулирования (при уменьшении статической ошибки регулирования ниже некоторого критического значения система теряет устойчивость). Дальнейшее развитие такой техники пошло по пути поиска способов преодоления этого противоречия. Переход от регуляторов прямого действия к устройствам непрямого действия, использующим силовые усилители, с одной стороны, усложнил проблему устойчивости, введя в контур дополнительные инерционные звенья. С другой, сделал схему регулятора более гибкой — с возможностью введения в различные точки схемы дополнительных связей и корректирующих звеньев.

Видное место в теории регулирования отводится работам словацкого ученого А. Стодолы. По его предложению математик А. Гурвиц разработал широко известный критерий устойчивости линейных систем. А. Стодола развил теорию применительно к регулированию гидравлических турбин. Крупный вклад был внесен Н.Е. Жуковским, исследовавшим влияние сухого трения в регулятор. Ученый изложил в своем курсе «Теория регулирования хода машин» (первом русском учебнике) начало теории прерывистого регулирования с применением уравнений в конечных разностях.

Значительную роль в развитии теории автоматического регулирования сыграли труды П.Л. Чебышева. В 1871 году выдающийся математик и механик опубликовал работу «О центробежном уравнивателе». В ней была впервые поставлена задача о синтезе регулятора прямого действия, обеспечивающего наибольшую точность регулирования при заданной схеме.

В 1892 году вышла в свет работа А.М. Ляпунова «Общая задача об устойчивости движения». Этот труд стал важной вехой в развитии теории устойчивости и теории регулирования. А.М. Ляпунов дал первое в истории науки математически строгое определение устойчивости движения и разработал две методики решения задачи, связанной с устойчивостью. Так, особое значение метода первого приближения заключается в обосновании и установлении точных границ применимости анализа устойчивости нелинейных систем по линейным уравнениям. Теоремы, доказанные А.М. Ляпуновым, математически обосновывают всю теорию устойчивости систем автоматического регулирования. Его работы, посвященные проблеме устойчивости движения, определили целую эпоху в развитии механики и теории автоматического регулирования не только в СССР, но и за рубежом.

В начале XX века данная теория выходит за рамки прикладной механики, а в первой половине века —

формируется в общетехническую дисциплину. В этот период публикуются работы А. Стодолы о регулировании гидротурбин, книги Н.Е. Жуковского (1909), М. Толле (1905), Е. Жюильера (1928) и др. Становится очевидным, что регулирование в различных отраслях техники базируется на ряде общих законов. Эта мысль четко формулируется в работах И.Н. Вознесенского. Этот ученый считается основателем одной из крупных советских школ в области регулирования в 1920–1930 годах. В тот период в отечественной промышленности группы специалистов перерастают в школы советского регуляторостроения: ВЭИ, ВТИ, ЦКТИ и др.

По мере усложнения систем и повышения требований к точности регулирования классические методы, предназначенные, как правило, для исследования устойчивости линейных систем по алгебраическим критериям, перестают отвечать запросам инженеров. Начинаются поиски новых путей. Мысль исследователей в первую очередь обращается к привычным для инженера графоаналитическим методам, прежде всего к частотным. В 1932 году Х. Найквист (США) разрабатывает критерий устойчивости радиотехнических усилителей с обратной связью по частотной характеристике системы в разомкнутом состоянии. В 1936 году А.В. Михайлов указывает на преимущества применения частотных методов, в том числе и критерия Найквиста, к системам регулирования. Также он предлагает свой критерий устойчивости, который не требует предварительного размыкания цепи.

Благодаря введению частотных методов начинается новый этап быстрого развития теории. Г. Боде и Л. Маккол (США; 1946) и В.В. Солодовников (СССР; 1948) разрабатывают метод логарифмических частотных характеристик. Это дает новые возможности для исследования качества регулирования и создания теории синтеза параметров и структур регуляторов математическими методиками. Ранее синтез осуществлялся посредством интуиции и изобретательства. Начался следующий этап в развитии теории, и в 1940–1950 годах сформировалась новая теория автоматического регулирования.

Ученые разработали методы, существенно облегчающие применение различных критериев устойчивости в исследованиях и инженерных расчетах. Появлялись различные способы построения областей устойчивости в плоскости настраиваемых параметров системы. В их числе выделяется метод D-разбиения Неймарка. Вводились различные количественные оценки показателей качества процесса регулирования. Например, это время регулирования и перерегулирования, колебательность, выброс, степень устойчивости. К.Ф. Теодорчик, Г.А. Бендриков, У. Ивенс, Дж. Траксел разработали метод корневого годографа. П.С. Стрелковым и Э.Г. Удерманом получены интересные результаты по детальному изучению влияния на переходный процесс расположения нулей и полюсов передаточной функции, в частности путем выделения доминирующих полюсов с целью упрощения исследования. Развивались различные интегральные оценки качества с помощью определенных интегралов с бесконечным верхним пределом. Наиболее интересные для практики результаты

были достигнуты А.А. Красовским, А.А. Фельдбаумом, Г. Джеймсом, Н. Никольсом и Р. Филиппсом.

Осуществлялись интересные поиски новых принципов управления и структурных решений для построения систем управления. В 1930-х годах И.Н. Вознесенский сформулировал принцип автономности регулирования. Он предложил на регуляторы в системах регулирования нескольких величин накладывать дополнительные связи, обеспечивающие автономное действие каждого из регуляторов только на одну из регулируемых величин. При этом уравнение системы расчленяется на несколько независимых друг от друга уравнений для каждой из регулируемых величин. В конце 1930-х годов Г.В. Шипанов озвучил принцип инвариантности, при котором достигалась независимость тех или иных регулируемых величин от возмущений. Ряд неточностей и ошибок, допущенных автором, вызвал острую дискуссию. Впоследствии Б.Н. Петров и другие ученые установили условия реализуемости принципа инвариантности. Идея Г.В. Шипанова была признана открытием. М.В. Мееров рассмотрел класс структур регулируемых систем, допускающих теоретически беспредельное увеличение коэффициента усиления. По времени приведенные работы предвосхищали идею метода сингулярных возмущений для декомпозиции сложных многосвязных систем на более простые — быструю и медленную — системы.

В 1932 году Н.М. Крылов и Н.Н. Боголюбов предложили способ гармонического баланса. В его основу были положены асимптотические разложения, представляющие собой дальнейшее развитие методов теории возмущений. Впервые этот способ применил для решения нелинейных задач теории регулирования Л.С. Гольдфарб в 1940 году.

На основе идей Н.М. Крылова и Н.Н. Боголюбова ученый Е.П. Попов создает теорию гармонической линеаризации. Он также разрабатывает способ определения автоколебаний, основанный на применении годографа Михайлова линейной части и эквивалентной передаточной функции нелинейной части системы. В 1953 году Е.П. Попов распространяет методы гармонической линеаризации на системы с несколькими нелинейностями.

Б.В. Булгаков еще в 1942 году изучал возможность применения способа А. Пуанкаре к определению периодических режимов в нелинейных системах.

А.А. Андронов и ряд других советских ученых, рассматривая процессы в ламповом генераторе как в нелинейной динамической системе, разработали методы исследований нелинейных колебаний на основе понятия фазового пространства. Посредством способа точечных преобразований они исследовали фазовое пространство ряда нелинейных систем автоматического регулирования, имеющих большое практическое значение.

Н.Г. Четаев, используя способ Ляпунова, формулирует задачу устойчивости на конечном интервале, развивает теорию характеристических чисел, а также указывает на аналитические и геометрические возможности прямого метода Ляпунова. А.И. Лурье разрабатывает метод построения функций Ляпунова, основываясь на приведении уравнений систем автоматического регулирования к канонической форме.

Этот способ, доведенный самим ученым до рабочего алгоритма, существенным образом упрощает задачу анализа устойчивости одного из классов нелинейных систем.

А.М. Летов на основе идей Ляпунова по оценке времени затухания переходного процесса предложил метод отыскания экстремальных значений квадратичной формы замкнутой поверхности для оценки качества нелинейных систем регулирования. После появились статьи и книги Н.П. Еругина и В.И. Зубова, в которых они описали наиболее полное решение проблемы обращения в теории устойчивости Ляпунова. Интересные результаты об устойчивости в целом были представлены Е.А. Барбашиным и Н.Н. Красовским.

В 1960 году румынский математик В.М. Попов озвучил достаточные условия абсолютной устойчивости в частотной области. А.А. Якубович значительно усилил полученные В.М. Поповым результаты.

Теоретические основы дискретных систем автоматического регулирования развивал Я.З. Цыпкин. Еще в 1948 году он предложил частотный критерий устойчивости дискретных систем. Затем ученый на принципе дискретного преобразования Лапласа создал основы общей теории линейных импульсных систем. В США аналогичные результаты были получены Джурри на основе z -преобразования. В теории релейных систем автоматического регулирования Я.З. Цыпкин сформулировал точный метод решения задачи о вынужденных колебаниях. В своих работах, посвященных исследованию устойчивости периодических режимов, он распространяет частотные методы анализа и синтеза на релейные системы регулирования.

Широкое применение следящих систем, работающих в условиях помех, сделало одной из главных задач теории регулирования решение проблем динамической точности следящих систем, которые находятся под влиянием случайных воздействий. В.В. Солодовниковым и В.С. Пугачевым на основе классических работ А.Н. Колмогорова, А.Я. Хинчина и Н. Винера были получены фундаментальные результаты в теории систем управления при случайных воздействиях.

В 1950–1960 годах наблюдалось значительное усложнение объектов управления. Появились задачи управления космическими объектами, ракетами различного назначения (баллистическими и зенитными), подводными лодками, танками и другими образцами военной техники и вооружения. Промышленность тех лет поставила задачи управления объектами химической и электронной технологии, пищевого и микробиологического производства. В теории управления появились новые понятия, более широко стали использоваться арсенал математики, численные методы и вычислительная техника.

В 1960-е годы А.М. Летов, Р. Калман и А.А. Красовский разработали теорию аналитического конструирования регуляторов.

В те же годы В.М. Матросов и Р. Беллман создали метод векторных функций Ляпунова, ставший мощным средством для исследования сложных систем управления.

При управлении подвижными объектами нередко встает вопрос оптимального управления в соответствии с выбранным критерием оптимальности (быстродействи-

ем, энергетика, точность). Математический аппарат решения задач оптимального управления был разработан Л.С. Понтрягиным и его учениками. Они сформулировали принцип максимума. Р. Беллман в США разработал метод динамического программирования. Работы Л.С. Понтрягина и Р. Беллмана стимулировали многочисленные исследования, связанные с неклассическими методами вариационного исчисления.

В 1960–1980-х годах фиксировались интересные результаты в области систем управления с время-импульсной модуляцией. Теорию этих систем разрабатывали В.М. Кунцевич, Ю.Н. Чеховой, А.Х. Гелиг и В.М. Лохин.

В 1980–1990-е годы вышли в свет работы Л.М. Бойчука и П.Д. Крутько, посвященные применению метода обратных задач динамики для решения вопросов исследования и синтеза систем управления.

Работа современных систем управления часто осуществляется в условиях неопределенности и нестационарности. С 1960-х годов начинает разрабатываться теория адаптивных систем управления, позволяющих работать в таких условиях. Наиболее значимые результаты в этой области были получены Б.Н. Петровым, В.Ю. Рутковским, А.А. Якубовичем. С конца 1980-х годов ведется интенсивная разработка теории робастных (грубых) систем управления. Ее основы были заложены еще А.А. Андроновым и Л.С. Понтрягиным.

С.В. Емельянов и А.Ф. Филиппов создают теорию систем с переменной структурой.

Научными школами Л.С. Понтрягина и Н.Н. Красовского формулируются методы управления подвижными объектами в условиях конфликта.

В 1960–1990-е годы в нашей стране и за рубежом выполнены многочисленные работы по разработке машинно ориентированных методов исследования систем управления. В это время появились программные комплексы для исследования и разработки сложных систем управления.

С 1990-х годов разрабатывается концепция создания интеллектуальных систем управления, в ней реализован принцип накопления и использования знаний об условиях функционирования объектов управления (научная школа И.М. Макарова и В.М. Лохина).

В XXI веке признанным специалистом в области искусственного интеллекта считается профессор Н.Г. Загоруйко. Искусственный интеллект применяется во многих сферах жизнедеятельности человека — от распознавания болезней в организме до предложения товара в интернете в виде рекламного баннера. Несомненно, за ИИ будущее. С развитием общества интеллектуальная нагрузка на человека только увеличивается — он не может уже справляться сам, ему нужен помощник. И разработка искусственного интеллекта решает эту проблему, однако до УИИ нам еще далеко.

Сложные объекты управления

Теперь можно дать определение понятию «сложный объект управления», а также ответить на важный вопрос: в какой степени манипуляционные и мобиль-

ные роботы соответствуют свойству сложности? Как следствие, необходимо определить и методы управления сложными объектами. Итак, они называются сложными, если соответствуют ряду признаков:

1) объекты состоят из большого числа элементов, взаимодействующих между собой в процессе функционирования. Как правило, у манипуляционного робота есть не менее шести взаимосвязанных звеньев. Они позволяют ему совершать движение в пространстве с изменяемой ориентацией захватного устройства. В состав аппаратных средств мобильных роботов также входит достаточно большое число составных элементов. Это платформы, колеса или гусеничная ходовая система, двигательная установка с трансмиссией и т. д. Все перечисленное позволяет считать, что манипуляционные и мобильные роботы обладают таким свойством;

2) математические модели объектов представляют собой сложные конструкции. Это системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений высокой размерности или дифференциальных уравнений в частных производных, в которых есть разнообразные факторы неопределенности. С учетом вышесказанного и второе свойство сложных объектов присуще манипуляционным и мобильным роботам;

3) система управления такими объектами имеет иерархический (многоуровневый) характер. Исторически сложилось так, что при построении системы управления манипуляционными и мобильными роботами используется трехуровневая структура. На нижнем (исполнительном) уровне решается задача отработки задающих воздействий, поступающих со среднего (тактического). Целью его функционирования является формирование задающих воздействий на исполнительный уровень. Верхний (стратегический) — формирует поведение робота: быстродействие, точностные свойства, осторожность и т. д.;

4) в объекте проявляется свойство многосвязности. Оно заключается в том, что на управление в выбранном канале влияют процессы, происходящие в остальных каналах. Такое свойство является следствием многосвязности математических моделей кинематики и динамики как манипуляционных, так и мобильных роботов;

5) при оценке качества функционирования объекта следует использовать не один показатель, а целую их совокупность. Как правило, такие критерии имеют противоречивый характер. Обширный опыт проектирования и функционирования сложных объектов показал, что их свойства могут быть описаны целой совокупностью показателей (критериев) качества: функциональных (точностные — динамические и статические, быстродействие и т. д.), надежностных, стоимостных и т. п. Это в полной мере относится к манипуляционным и мобильным роботам;

б) во время построения системы управления объектом необходимо применять интеллектуальные технологии.

Заключение

Остановить развитие робототехники уже невозможно, поэтому всем странам, желающим быть в авангарде мировой промышленности, приходится это принимать и догонять.

В последнее время проявляется тенденция к использованию интеллектуальных технологий как важного средства повышения эффективности манипуляционных и мобильных роботов [16, 17].

Первоначально такие системы создавались для промышленности и были ориентированы на совершенствование методов управления производственными процессами. К ним относились автоматизированные системы управления (АСУ) — совокупность экономических и математических способов, технических средств организационных комплексов, которые обеспечивали рациональное управление процессом в соответствии с заданной целью.

К сожалению, единственного и универсального метода управления сложными объектами не существует. Для различных технических, экономических, общественных и других систем накоплен опыт использования приближенных способов выработки управляющих воздействий. Иногда он годится только для данного класса объектов. Тем не менее можно выделить ряд общих особенностей различных методов управления.

Для подавляющего большинства сложных объектов применяется иерархический способ построения управления. Это позволяет существенно упростить схему — каждый уровень занимается своим кругом задач. Важно лишь наладить координацию взаимодействия данных уровней.

Для многосвязных объектов часто актуален принцип построения автономного управления по каждому из каналов. Это означает, что управляющее воздействие на выбранный канал не изменяет состояния объекта в других. В некоторых случаях используется инвариантный принцип построения управления. И здесь можно исключить влияние неблагоприятных внешних воздействий на состояние объекта.

Сейчас наблюдается тенденция развития интеллектуальных алгоритмов, основанных на использовании интеллектуальных технологий и методов построения систем управления иерархической архитектуры с применением процедур создания линеаризованных моделей манипуляционных и мобильных роботов и многокритериального выбора параметров управляющих устройств. Это позволяет заметно повысить качество управления сложными объектами в условиях неопределенности и в конфликтных ситуациях.

Литература/References

1. Марш П., Александер И., Барнетт П. и др. Не счесть у робота профессий. В кн.: Гурфинкель В.С., ред. Москва: Мир, 1987. 182 с. [Marsh P., Alexander I., Barnett P. et al. There are countless professions in a robot. In: Gurfinkel V.S., ed. Moscow: Mir, 1987. 182 p. (In Russ.).]
2. Ларичев О.И., Петровский А.В. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития. Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. Т. 21. М.: ВИНТИ, 1987: 131–164. [Larichev O.I., Petrovsky A.V. Decision support systems. The current state and prospects of their

- development. Results of science and technology. Technical Cybernetics. Vol. 21. М.: VINITI, 1987: 131–164. (In Russ.).
3. Боголюбов А.Н., Никитин Д.А. Популярно о робототехнике. К.: Наук. думка, 1989. 201 с. [Bogolyubov A.N., Nikitin D.A. Popularly about robotics. Kiev: Naukova Dumka, 1989. 201 p. (In Russ.).]
 4. Меркулов А.П. Что могут роботы. 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: Машиностроение, 1991. 192 с. [Merkulov A.P. What robots can do. 2nd edition, revised and supplemented. Moscow: Mechanical Engineering, 1991. 192 p. (In Russ.).]
 5. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах: учебное пособие. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2001. 244 с. [Antonov V.N., Terekhov V.A., Tyukin I. Yu. Adaptive control in technical systems: textbook. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 2001. 244 p. (In Russ.).]
 6. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники. Книга 2. М.: Наука, 2006. 376 с. [Korendyasev A.I. Theoretical foundations of robotics. Book 2. Moscow: Nauka, 2006. 376 p. (In Russ.).]
 7. Жимарши Ф. Сборка и программирование мобильных роботов в домашних условиях. М.: НТ Пресс, 2007. 288 с. [Zhimarshi F. Assembly and programming of mobile robots at home. Moscow: NT Press, 2007. 288 p. (In Russ.).]
 8. Крайнев А.Ф. Путешествие к истокам машиностроения. М.: Дрофа, 2008. 270 с. [Kraïnev A.F. Journey to the origins of mechanical engineering. М.: Drofa 2008. 270 p. (In Russ.).]
 9. Юревич Е.И. Основы робототехники. 4-е издание, переработанное и дополненное. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 304 с. [Yurevich E.I. Fundamentals of robotics. 4th edition. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2008. 304 p. (In Russ.).]
 10. Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах. Синергетика: от прошлого к будущему. М.: ЛКИ, 2014. 384 с. [Terekhov V.A., Tyukin I. Yu. Adaptation in nonlinear dynamic systems. Synergetics: from the past to the future. Moscow: LKI, 2014. 384 p. (In Russ.).]
 11. Микеров А.Г. Классики линейной теории автоматического регулирования. Control Engineering Russia. 2015; 1 (55): 76–79. [Mikero A.G. Classics of the linear theory of automatic regulation. Control Engineering Russia. 2015; (55): 76–79. (In Russ.).]
 12. Форд М. Роботы наступают. Развитие технологий и будущее без работы. М.: Альпина нон-фикшн, 2016. 430 с. [Ford M. The robots are advancing. Technology development and the future without work. Moscow: Alpina non-fiction, 2016. 430 p. (In Russ.).]
 13. Иванов А.А. Основы робототехники. Учебное пособие. М.: Инфра-М, 2018. 224 с. [Ivanov A.A. Fundamentals of robotics. Textbook. Moscow: Infra-M, 2018. 224 p. (In Russ.).]
 14. Плютюв Ю.А. История техники в горном деле. М.: Грифон, 2017. 727 с. [Plyutov Yu.A. The history of technology in mining. Moscow: Gryphon, 2017. 727 p. (In Russ.).]
 15. Спиридонов А.В. История робототехники и методов управления сложными объектами. Маркшейдерия и недропользование. 2021; 3 (113): 56–61. [Spiridonov A.V. History of robotics and methods of controlling complex objects. Surveying and Subsoil Use. 2021; 3 (113): 56–61. (In Russ.).]
 16. Суфияров В.Ш., Борисов Е.В., Панченко О.В. и др. Цифровые технологии моделирования и изготовления функционально-градиентных материалов и конструкций методами аддитивного производства. Технический оппонент. 2019; 4 (5): 31–38. [Sufiarov V. Sh., Borisov E. V., Panchenko O. V. et al. Digital technologies of modeling and fabrication of functionally graded materials and structures by additive manufacturing methods. Tekhnicheskii opponnet = Technical Opponent. 2019; 4 (5): 31–38. (In Russ.).]
 17. Сафонов Ю.М., Дульнев Н.Н., Федорцов Н.Н. Определение оптимальной скорости обработки траектории коллаборативным роботом. Технический оппонент. 2018; 1 (1): 24–33. [Safonov Yu.M., Dulnev N.N., Fedortsov N.N. Determination of the optimum speed failover, the trajectory of global collaborative robot. Tekhnicheskii opponnet = Technical Opponent. 2018; 1 (1): 24–33. (In Russ.).]

Вклад авторов. А.В. Спиридонов, И.Г. Деревяшкин, В.П. Спиридонов: разработка дизайна исследования, получение данных для анализа, обзор публикаций по теме статьи, статистический анализ полученных данных, написание текста рукописи.

Authors contributions. A.V. Spiridonov, I.V. Derevyashkin, V.P. Spiridonov: developing of research design, obtaining data for analysis, reviewing publications on the topic of the article, statistical analysis of the obtained data, article writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declares no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Financing. The study was performed without external funding.

Статья поступила: 03.12.2021. **Принята к публикации:** 14.01.2022.
Article received: 03.12.2021. **Accepted for publication:** 14.01.2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Спиридонов Александр Валерьевич, инженер-технолог 1-й категории отдела 540 производства микрорелектронных устройств и инновационных ГИБов, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения. Адрес: 129301, г. Москва, проспект Мира, д. 125. Телефон: +7 (495) 981-56-30. E-mail: corund@gosniip.ru.

Деревяшкин Игорь Владимирович, профессор, д.т.н., профессор кафедры техники и технологии горного и нефтегазового производства, Московский политехнический университет*. Профессор кафедры горного дела, филиал Национального

исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Губкин.

* Адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38. Телефон: +7 (495) 223-05-23. E-mail: mospolytech@mospolytech.ru. ORCID: 0000-0002-1520-34550.

Спиридонов Валерий Петрович, к.т.н., профессор кафедры инженерной теплофизики и гидравлики Академии государственной противопожарной службы МЧС России. Адрес: 129301, г. Москва, ул. Б. Галушкина, д. 4, стр. 2. Телефон: +7 (495) 617-27-27. E-mail: info@academygprs.ru. ORCID: 000-0002-8794-8384.

AUTHORS INFORMATION

Spiridonov Alexander Valeryevich, engineer-technologist of the 1st category of Department 540 microelectronic devices and innovative GIBs production, State Research Institute of Instrument Engineering. Address: 125 Prospekt Mira, Moscow, 129301. Phone: +7 (495) 981-56-30. E-mail: corund@gosniip.ru

Derevyashkin Igor Vladimirovich, Professor, DScTech, Professor of the Department of Mining Engineering and Technology, Moscow Polytechnic University*. Professor of the Department of Mining Engineering, branch of National Research Technological University «MISIS», Gubkin. * Address: 38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, 107023. Phone: +7 (495) 223-05-23. E-mail: mospolytech@mospolytech.ru. ORCID: 0000-0002-1520-34550.

Spiridonov Valery Petrovich, PhD in Technology, Professor, Department of Engineering Thermophysics and Hydraulics, Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia. Address: 4, bld. 2, Galushkin St., Moscow, 129301. Phone: +7 (495) 617-27-27. E-mail: info@academygprs.ru. ORCID: 000-0002-8794-8384.

Организатор



При
поддержке



Устроитель



XIV ЮБИЛЕЙНАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ

19–21 мая

www.helirusia.ru

13-16 СЕНТЯБРЯ 2022



ХІ ПЕТЕРБУРГСКИЙ
МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ГАЗОВЫЙ
ФОРУМ