

ISSN 2949-1215



Российская Академия Наук
ТРУДЫ
Кольского научного центра РАН

3/2022(13)

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

0+

Российская Академия Наук
ТРУДЫ

3/2022(13)

Научно-информационный журнал
Основан в 2010 году
Выходит 4 раза в год

Кольского научного центра. Серия: Технические науки

Главный редактор
акад. РАН, д. г.-м. н. С.В. Кривовичев

Заместитель главного редактора
к. б. н. Е.А. Боровичев

Редакционный совет:
акад. РАН, д. б. н. Г.Г. Матишов,
чл.-корр. РАН д. б. н. В.К. Жиров,
чл.-корр. РАН д. т. н. А.И. Николаев,
чл.-корр. РАН, д. х. н. И.Г. Тананаев,
д. э. н. Ф.Д. Ларичкин,
д. ф.-м. н. Е.Д. Терещенко,
к. т. н. А.С. Карпов (отв. секретарь)

Редколлегия серии:
чл.-корр. РАН, д. т. н. А.И. Николаев,
чл.-корр. РАН, д. х. н. И.Г. Тананаев,
д. т. н. А.В. Горохов,
д. х. н. С.Р. Деркач,
д. т. н. Б.В. Ефимов,
д. т. н. А.А. Козырев,
д. т. н. Н.В. Коровкин,
д. т. н. С.И. Кривошеев,
д. х. н. С.А. Кузнецов,
д. т. н. С.В. Лукичев,
д. т. н. В.А. Марлей,
д. т. н. М.В. Маслова,
д. т. н. А.В. Маслобоев,
д. т. н. В.А. Маслобоев,
д. т. н. О.В. Наговицын,
д. т. н. А.Г. Олейник,
д. т. н. В.В. Рыбин,
д. т. н. А.Я. Фридман,
д. т. н. М.Г. Шишаев,
к. т. н. Т.Н. Васильева,
к. т. н. И.О. Датьев,
к. х. н. Д.П. Домонов,
к. т. н. О.Г. Журавлева,
к. т. н. А.И. Калашник,
к. т. н. А.С. Карпов,
к. т. н. В.В. Колобов,
к. т. н. Н.М. Кузнецов,
к. т. н. С.М. Маслобоева,
к. т. н. В.А. Минин,
к. т. н. Г.И. Митрофанова,
к. т. н. А.С. Опалев,
к. т. н. В.Н. Селиванов,
к. т. н. И.Э. Семенова,
к. т. н. А.М. Фёдоров

Ответственный редактор номера
В.В. Ивонин

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН»»

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-83502 от 30 июня 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.

Научное издание

Технический редактор В. Ю. Жиганов
Редактор Е. Н. Еремеева
Подписано к печати 29.12.2022.
Дата выхода в свет 29.12.2022.
Формат бумаги 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 12,79. Заказ № 67. Тираж 500 экз.
Свободная цена.

Адрес учредителя, издателя и типографии: Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр РАН»»
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14
Тел.: (81555) 7-53-50; 79-5-95, факс: (81555) 76425
E-mail: ksc@ksc.ru. www.ksc.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Кузнецов Н. М., Селиванов В. Н.	Энергетические исследования в Мурманской области.....	5
Минин В. А.	Потенциал и перспективы использования возобновляемых источников энергии Мурманской области.....	21
Победоносцева В. В.	Как разрабатывался механизм инвестирования строительства Кольской АЭС-2: история практики и теории.....	32
Коновалова О. Е.	Перспективы использования энергии малых рек для электроснабжения удаленных потребителей Архангельской области.....	43
Лазарев Н. И.	Развитие биоэнергетики в Мурманской области.....	52
Селиванов В. Н., Бурцев А. В., Ивонин В. В., Колобов В. В.	Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2021 году.....	59
Губская Е. И.	Решение задач электромагнитной совместимости специализированными программными средствами.....	68
Селиванов В. Н., Климов А. А.	Разрушение твёрдых композиционных отходов импульсами высокого напряжения.....	79
Зорин А. С.	Электроимпульсная технология дробления твёрдых диэлектрических материалов. Факторы, оказывающие влияние на динамику разрядных процессов.....	87
Потокин А. С., Климов А. А., Колобов В. В.	Исследование горных пород с обогатительных комбинатов Мурманской области на лабораторном образце электроимпульсной дезинтеграционной установки.....	97

3/2022(13)

Russian Academy of Sciences
TRANSACTIONS

Kola Science Centre. Series: Engineering Sciences

Editor-in-Chief

S.V. Krivovichev, Academician of RAS,
Dr. Sc. (Geology & Mineralogy)

Deputy Editor-in-Chief

E.A. Borovichev, PhD (Biology)

Editorial Council:

G.G. Matishov, Academician of RAS, Dr. Sc. (Biology),
V.K. Zhiron, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Biology),
A. I. Nikolaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Engineering),
I.G. Tananaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Chemistry),
F.D. Larichkin, Dr. Sc. (Economics),
E.D. Tereshchenko, Dr. Sc. (Physics and Mathematics),
A.S. Karpov, PhD (Engineering) — Executive Secretary

Editorial Board:

A. I. Nikolaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Engineering),
I.G. Tananaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Chemistry),
A.V. Gorokhov, Dr. Sc. (Engineering),
S.R. Derkach, Dr. Sc. (Chemistry),
B.V. Efimov, Dr. Sc. (Engineering),
A.A. Kozirev, Dr. Sc. (Engineering),
N.V. Korovkin, Dr. Sc. (Engineering),
S.I. Krivosheev, Dr. Sc. (Engineering),
S.A. Kuznetsov, Dr. Sc. (Chemistry),
S.V. Lukichev, Dr. Sc. (Engineering),
V.A. Marlej, Dr. Sc. (Engineering),
M.V. Maslova, Dr. Sc. (Engineering),
A.V. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering),
V.A. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering),
O.V. Nagovitsin, Dr. Sc. (Engineering),
A.G. Oleinik, Dr. Sc. (Engineering),
V.V. Ribin, Dr. Sc. (Engineering),
A.Ya. Fridman, Dr. Sc. (Engineering),
M.G. Shishaev, Dr. Sc. (Engineering),
T.N. Vasileva, PhD (Engineering),
I.O. Datjev, PhD (Engineering),
D.P. Domonov, PhD (Chemistry),
O.G. Zhuravleva, PhD (Engineering),
A.I. Kalashnik, PhD (Engineering),
A.S. Karpov, PhD (Engineering),
V.V. Kolobov, PhD (Engineering),
N.M. Kuznetsov, PhD (Engineering),
S.M. Masloboeva, PhD (Engineering),
V.A. Minin, PhD (Engineering),
G.I. Mitrofanova, PhD (Engineering),
A.S. Opalev, PhD (Engineering),
V.S. Selivanov, PhD (Engineering),
I.E. Semenova, PhD (Engineering),
A.M. Fedorov, PhD (Engineering)

Executive Editor

V. V. Ivonin

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia
Tel.: (81555) 79380. Fax: (81555) 76425
E-mail: ksc@ksc.ru. www.ksc.ru

CONTENTS

Kuznetsov N. M., Selivanov V. N.	Energy research in the Murmansk region.....	5
Minin V. A.	Potential and prospects for the use of renewable energy sources of the Murmansk region.....	21
Pobedonostseva V. V.	How the mechanism of investing the construction of the Kola Nuclear Power Plant — 2 was elaborated: history of practice and theory.....	32
Konovalova O. E.	Prospects of using the energy of small rivers for electricity supply to remote consumers of the Arkhangelsk region.....	43
Lazarev N. I.	Development of bioenergy in the Murmansk region.....	52
Selivanov V. N., Burtsev A. V., Ivonin V. V., Kolobov V. V.	Lightning analysis for the Murmansk region in 2021.....	59
Gubskaya E. I.	Solving the problems of electromagnetic compatibility by using specialized software.....	68
Selivanov V. N., Klimov A. A.	Fracturing of solid composite waste with high voltage pulses.....	79
Zorin A. S.	Electro-pulse technology of destruction of solid dielectric materials. Factors influencing the dynamics of discharge processes.....	87
Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V.	Research of rocks from mining plants of Murmansk region on a laboratory sample of electric pulse disintegration installation.....	97

Научная статья
УДК 621.9
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.001

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Николай Матвеевич Кузнецов¹, Василий Николаевич Селиванов²

^{1, 2}Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹n.kuznetsov@ksc.ru

²v.selivanov@ksc.ru

Аннотация

Показана хронология развития энергетических исследований на Кольском полуострове. Представлены основные результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке путей эффективного развития и функционирования энергетических систем в условиях Арктики на новой технологической основе в условиях глобализации, включая проблемы энергобезопасности, энергосбережения и рационального освоения природных энергоресурсов.

Ключевые слова:

энергетические исследования, топливно-энергетический баланс, возобновляемые источники энергии, энергетические системы, энергетическая безопасность, повышение энергетической эффективности

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Кузнецов Н. М., Селиванов В. Н. Энергетические исследования в Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 5–20. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.001

Original article

ENERGY RESEARCH IN THE MURMANSK REGION

Nikolai M. Kuznetsov¹, Vasilii N. Selivanov²

^{1, 2}Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

¹n.kuznetsov@ksc.ru

²v.selivanov@ksc.ru

Abstract

The chronology of the development of energy research on the Kola Peninsula, is shown. The main results of fundamental and applied research on the development of ways of effective advancement and functioning of energy systems in the Arctic on a new technological basis in the context of globalization, including the problems of energy security, energy efficiency and rational development of natural energy resources, are presented.

Keywords:

energy research, fuel and energy balance, renewable energy sources, energy systems, energy security, energy efficiency improvement

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Kuznetsov N. M., Selivanov V. N. Energy research in the Murmansk region // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 5–20. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.001

Введение

В 2000 г. в издательстве Кольского научного центра Российской академии наук (КНЦ РАН) был опубликован исторический очерк «Энергетические исследования в Кольском научном центре РАН (1950–2000 годы)» [1], посвященный десятилетию образования центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН и одновременно пятидесятилетию энергетических исследований в Кольском филиале РАН. В качестве даты создания был выбран момент преобразования Кольской

научно-исследовательской базы имени С. М. Кирова Академии наук (АН) СССР (КБАН СССР) в Кольский филиал имени С. М. Кирова АН СССР (КФАН СССР), в состав которого по постановлению Президиума АН СССР № 123 от 15 февраля 1950 г. вошел в числе прочих Отдел гидроэнергетики. Однако в более ранней работе [2], приуроченной к двадцатипятилетию Отдела энергетики, указан другой год образования — 1949 г.

Каких-либо приказов об образовании подразделения в 1949 г. в архиве КНЦ РАН мы не обнаружили, но нашли упоминание о лаборатории гидроэнергетики в приказе № 104 от 16 июня 1949 г. о штатной расстановке кадров Кольской научно-исследовательской базы. Однако в подобном приказе № 34 от 5 июня 1948 г. также упоминается сектор энергетики, а в приказе № 59 от 17 июля 1948 г. — лаборатория гидроэнергетики в составе заведующего лабораторией кандидата технических наук Ивана Алексеевича Кузнецова, старшего научного сотрудника, кандидата биологических наук Ивана Петровича Савватимского, младшего научного сотрудника Самуила Григорьевича Гребельского, старшего лаборанта Михаила Григорьевича Федотова, лаборанта Н. А. Акимовой и препаратора Алевтины Алексеевны Касаткиной. Из личного дела И. А. Кузнецова известно, что еще в 1946 г. его приглашали занять должность руководителя сектора водного хозяйства и гидрологии КБАН СССР, а приказом № 9 от 5 апреля 1948 г. он зачислен на должность заведующего сектором энергетики с 1 апреля 1948 г. План работы сектора энергетики на 1948 г. обсуждался Ученым советом Кольской базы 12 сентября 1947 г. (протокол № 5).

Нужно отметить, что даты образования подразделениями КНЦ РАН трактуются по-разному. Например, геологи (Геологический институт (ГИ) КНЦ РАН) ведут отчет с 1951 г., когда по распоряжению Совета Министров СССР № 23506-р от 8 декабря 1951 г. был создан Геологический институт, хотя геологические исследования велись на Кольской базе с момента её образования в 1930 г. Институты химии (Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС) КНЦ РАН) и экономики (Институт экономических проблем (ИЭП) КНЦ РАН) в исторических справках отмечают, что структурные единицы соответствующих направлений были созданы ещё в 1930-е гг., но в качестве даты основания указывают год приказа о создании институтов.

Институт физико-технических проблем энергетики Севера (ИФТПЭС) КНЦ РАН также существовал в Кольском научном центре с 1990 г., однако постановлением Президиума РАН от 17 февраля 2004 г. № 54 и постановлением Президиума КНЦ РАН от 10 июня 2004 г. № 5 был преобразован в филиал КНЦ РАН — Центр физико-технических проблем энергетики Севера (ЦФТПЭС) КНЦ РАН. Это было не первое и, вероятно, не последнее изменение статуса нашего подразделения, что дает нам основание в качестве даты рождения выбрать 1948 г. — год возникновения на Кольской базе первого структурного образования, деятельность которого тем или иным образом связана с энергетическими исследованиями.

Энергетические исследования до 1948 г.

Кольский полуостров чрезвычайно богат минеральными и природными ресурсами, чем издревле привлекал к себе исследователей и добытчиков со всего мира. Длительное время единственным источником энергии в этих местах были дрова, однако промышленная добыча требовала более надежных и мощных источников, к поиску и исследованию которых привлекали квалифицированных инженеров и ученых.

В феврале 1907 г. норвежская железорудная добывающая компания «Сюдварангер» обратилась к российскому правительству с просьбой об аренде Борисоглебского водопада на реке Паз на пятьдесят лет [3]. Представители комбината указывали на бесполезность этого участка для России, оценили мощность Борисоглебского падуна всего в четыре тысячи лошадиных сил и пообещали платить за него три тысячи рублей в год.

Для проверки норвежских расчетов в августе 1907 г. на реку Паз командировали профессора Харьковского технологического института, действительного статского советника Василия Ивановича Альбицкого. Возможности реки близ Борисоглебской церкви, по его выводам, составили от 24 до 37 тысяч лошадиных сил, а условия, предложенные «Сюдварангером», он считал не выгодными для России.

Исследования энергетических ресурсов на Кольском полуострове в годы между двумя мировыми войнами неразрывно связаны с именами таких исследователей, как профессор А. А. Григорьев [4], инженеры-гидроэнергетики С. В. Григорьев, А. М. Евстифеев и И. Д. Вовкушевский, геоморфологи Н. В. Полонский и Г. Д. Рихтер.

Первые технические исследования рек Кольского полуострова — Туломы, Колы, Нивы, Колвицы, Паз — как источников энергии были проведены в 1917 г. (инженеры И. Д. Вовкушевский и С. В. Григорьев — Управление внутренних водных путей Министерства путей сообщения Российской империи) [5].

В 1918 г. составлены первые предварительные проекты энергетического исследования рек Кольского полуострова: верхней Туломы (инженер Евстифеев), Колы (инженеры Евстифеев и С. В. Григорьев), всей реки Нивы (С. В. Григорьев), нижней Ковды (С. В. Григорьев) [6, 7].

В 1922 г. опубликован первый опыт водноэнергетического кадастра Севера и Советской России вообще, который включал сведения по запасам гидроэнергии 28 рек Кольского полуострова и по 29 рекам Карелии [8].

В 1930 г. академиком А. Е. Ферсманом основана Хибинская горная станция АН СССР, которая в 1934 г. была преобразована в Кольскую базу академии наук СССР. Первоначально станция служила опорным пунктом для научно-исследовательских отрядов, занимавшихся поисковыми работами в районе Хибин и прилегающих к нему районах Кольского полуострова. Уже в 1930 г. по заданию треста «Гидроэлектропроект» специальный географо-разведочный отряд Г. Д. Рихтера изучает геологию и геоморфологию района реки Нивы — будущего строительства Нивской ГЭС.

В 1933 г. Карело-Мурманской комплексной партией Ленинградского отделения «Гидроэлектропроекта» выполнено рекогносцировочное обследование Варзуги и Поноя в целях выяснения возможностей использования гидроэнергетических ресурсов этих рек [9].

Документальные материалы, относящиеся к исследованиям запасов энергоресурсов Кольского полуострова и Мурманской области, имеются в фондах РАН за 1935–1938 гг.: П. А. Гарин «Энергетические показатели ветра (по материалам Карело-Мурманской экономической бригады АН СССР)», С. В. Григорьев «Запасы белого угля Карелии и Мурманска», Н. И. Берлинг «Торфяники Кольского полуострова и возможность их использования для получения кокса».

В 1938 г. кандидат технических наук Л. Б. Бернштейн начал исследования по использованию приливной энергии на Севере и предложил выбрать губу Кислую для сооружения приливной электростанции, а в 1958 г. на конференции по энергетике Северо-Запада СССР он показал богатейшие перспективы использования этого вида энергии в условиях Кольского полуострова [10].

Исследования энергетических ресурсов Кольского полуострова выполнялись сотрудниками организаций из Москвы и Ленинграда. Собственного энергетического подразделения на Кольской базе не было. В 1939 г. в структуре базы значилась Торфяная группа географического отдела в составе двух сотрудников (в том числе руководитель группы — старший научный сотрудник А. В. Звонов). В отчетном докладе 1940 г. были представлены итоги работы группы, включающие результаты маршрутно-экспедиционного обследования торфяных месторождений центральной части Кольского полуострова, выполненные совместно с комбинатом «Апатит».

На заседании Президиума КБАН АН СССР от 29 января 1940 г. «Об итогах работы сессии ученого совета Кольской базы АН СССР в связи с десятилетием города Кировска» было отмечено: «В виду того, что вопросы энергетики в основном лимитируют развитие народного хозяйства Кольского полуострова предложить Кольской Базе поставить ряд специальных работ по вопросам изучения проблем энергетики, в частности тепловых источников для промышленности полуострова, организовав специальное совещание совместно с Северной Базой по вопросу об изучении и использовании девонских углей Чешской губы и углей Печерского бассейна».

На заседании Президиума АН СССР 15 октября 1940 г. была одобрена тематика научно-исследовательских работ на Кольском полуострове в 1941 г. с распределением тем по научно-исследовательским учреждениям АН СССР. В области энергетики за Кольской базой имени С. М. Кирова закреплялись: а) торфяные месторождения Северо-западного района Кандалакши с целью выявления перспектив для промышленного освоения торфяных месторождений; б) торфяные месторождения южной части Ловозерских Тундр.

Центральному учреждению АН СССР — Энергетическому институту имени Г. М. Кржижановского — поручались: а) освещение проблем гидроэнергетических ресурсов районов железорудных месторождений; б) анализ опыта по использованию и добыче торфа на Кольском полуострове (завод в Лапландии).

На этом же заседании была утверждена представленная дирекцией Кольской базы и Комиссией Президиума Академии наук СССР по Кольскому полуострову новая структура Кольской базы на 1941 г., где под п. 7 была обозначена Энергетическая группа. В проекте структуры, предложенном Ученым советом Кольской базы на рассмотрение, первоначально предполагалось образовать Отдел энергетики, состоящий из группы торфяных ресурсов, группы водных ресурсов, группы прочих энергетических ресурсов и лаборатории гидравлики и торфов, однако в окончательном варианте было принято название «Энергетическая группа».

Начавшаяся в 1941 г. Великая Отечественная война коренным образом изменила научно-исследовательские планы Кольской базы, отодвинув их реализацию на долгие годы.

Энергетические исследования 1948–1973 гг.

Продолжающееся освоение полезных ископаемых, послевоенное развитие производительных сил Мурманской области требовали надежного обеспечения энергетическими ресурсами и устойчивой работы уже существующей энергетической системы Мурманской области.

8 апреля 1947 г. Мурманский Обком ВКП(б), заслушав доклад Дирекции Кольской базы АН СССР об итогах работы и тематическом плане на 1947 г., признал направление научной деятельности базы не отвечающим задачам послевоенного пятилетнего плана восстановления и развития народного хозяйства Мурманской области и просил Президиум Академии наук СССР внести изменения как в направление работ, так и в структуру базы. В частности, признано необходимым сократить биологический раздел работ, упразднить сектор зоологии, сократить штаты ботанического сада и других биологических секторов и лабораторий для усиления геологического и минералогического секторов и лаборатории геохимии. Одновременно возбужден вопрос об организации в системе Кольской базы АН СССР секторов технологического и энергетического: «Областные организации настаивают на организации в системе Кольской базы технологического сектора и сектора энергетики с выделением Базе дополнительно штатов и ассигнований». Эти вопросы нашли свое отражение в проекте структуры базы и плане научно-исследовательских работ на 1948 г., которые полностью одобрены областными организациями и представлены в августе 1947 г.

В 1948 г. в штатной структуре Кольской базы появился сектор энергетики под руководством кандидата технических наук И. А. Кузнецова, в состав которого также вошли сотрудники ликвидированного сектора зоологии, состоявшего из лаборатории ихтиологии (руководитель кандидат биологических наук И. П. Савватимский) и лаборатории паразитологии (руководитель С. Г. Гребельский). Уже в августе и сентябре 1948 г. сотрудники лаборатории провели рекогносцировочное обследование реки Умбы с целью оценки ее энергетического и рыбохозяйственного значения. В 1949 г. были начаты рекогносцировочные гидрографо-гидрологические обследования реки Иоканги.

20 января 1950 г. исполняющим обязанности заведующего лабораторией гидроэнергетики был назначен заслуженный деятель науки Карело-Финской ССР, кандидат технических наук С. В. Григорьев, проработавший в этой должности до 1953 г. [7, 11].

В 1949 г. Кольская научная база АН СССР была преобразована в КФАН СССР, в состав которого по Постановлению Президиума АН СССР от 15 февраля 1950 г. № 123 как самостоятельное научное подразделение вошел Отдел гидроэнергетики. К середине 1950 г. в штате Отдела гидроэнергетики числилось пять человек: заведующий отделом кандидат технических наук С. В. Григорьев, старший научный сотрудник кандидат технических наук И. А. Кузнецов, младшие научные сотрудники Т. А. Жуков и В. К. Шапошников, лаборант М. Г. Федотов.

В 1955–1959 гг. подразделение называлось группой (лабораторией) гидрологии и гидроэнергетики, а в 1959–1960 гг. — отделом энергетики и водных ресурсов. В этот период подразделением руководили кандидат технических наук Владимир Вавилович Богданов, доктор технических наук Федор Игнатьевич Быдин, Виктор Владимирович Спасский.

В 1960 г. был образован Горно-металлургический институт, в состав которого в феврале 1961 г. был включен отдел энергетики под наименованием «Лаборатория энергетики и комплексных водохозяйственных проблем Горно-металлургического института Кольского филиала АН СССР». Исполняющим обязанности заведующего лабораторией был назначен Александр Петрович Панин.

На протяжении данного временного отрезка основной задачей подразделения было изучение гидроэнергетических ресурсов Кольского полуострова с целью обоснования строительства гидроэлектростанций. Были проведены экспедиционные работы с топографической съемкой на значительной части Кольского полуострова, завершено исследование водноэнергетических ресурсов его восточной части (рек Поной, Иоканьга, Варзина, Дроздовка, Восточная Лица и Харловка), закончено составление каталога и водноэнергетического кадастра рек Мурманской области.

Гидроэнергетические исследования явились исходными данными для разработки научных основ дальнейшего развития Кольской энергосистемы. Комплексные исследования гидроэнергетических ресурсов позволили усовершенствовать методику обобщенного учета потенциальных запасов гидроэнергетических ресурсов малых рек и составить гидроэнергетический кадастр 550 рек Мурманского гидрографического района [12–15].

Проведены гидрологическое и энергетическое исследования реки Умбы, определена возможность мощности каскада умбских гидросиловых установок, изучен вариант переброски стока реки Умбы в озеро Имандра для использования его на каскаде Нивских ГЭС, согласно которому мощность станций может быть увеличена на 40–50 тыс. кВт [16].

С учетом исследований и рекомендаций отдела гидроэнергетики осуществлено проектирование и строительство каскада ГЭС на реке Вороньей, выполнено строительство двух ГЭС на реке Териберке. Выполнена комплексная научно-исследовательская работа по оптимизации топливо-энергетического баланса Мурманской и соседних областей, определены режимы электропотребления промышленных предприятий, разработан прогноз энергопотребления Мурманской области, определены режимы отопления для районов Севера, установлена необходимость для этих районов периодического протапливания жилых и служебных помещений в летний период [17].

Выполнялись комплексные исследования по загрязнению озера Имандра промышленными выбросами горно-обогатительных комбинатов и промышленных предприятий, разработаны предложения по уменьшению загрязнения озера Имандра, восстановлению его рыбохозяйственного значения и расширению использования озера в рекреационных целях.

Энергетические исследования 1973–1989 гг.

Постановлением от 18 июля 1972 г. и приказом по Кольскому филиалу АН СССР от 8 сентября 1973 г. № 13 на базе лаборатории энергетики и комплексных водохозяйственных проблем Горного института КФАН СССР был организован Отдел энергетики как самостоятельное подразделение при Президиуме КФАН СССР.

Основные направления научных исследований отдела были определены постановлением Президиума АН СССР № 951 от 19 октября 1972 г.: исследование перспектив развития энергетического хозяйства Мурманской области и соседних районов; разработка эффективных методов использования гидроэнергетических ресурсов, энергии ветра и морских приливов; создание научных основ рационального использования и охраны водных ресурсов.

В момент создания отдел занимал восемь производственных помещений площадью 120 квадратных метров в корпусе ИХТРЭМС и доме 9а в Академгородке КФАН СССР. Штатное расписание отдела включало 23 сотрудника, в том числе: исполняющий обязанности заведующего отделом А. П. Панин, восемь младших научных сотрудников, три инженера, семь старших лаборантов, четыре человека — технический персонал.

С 1 января 1974 г. заведующим отделом был назначен доктор технических наук, профессор Игорь Родионович Степанов.

В этот период была проведена разработка вариантов формирования топливно-энергетического баланса Мурманской области и выполнен прогноз развития потребности народного хозяйства в энергоносителях (электроэнергия, пар, горячая вода и различные виды топлива), разработан технико-экономический доклад по реконструкции теплоснабжения города Кировска от Кировской ГРЭС.

Собраны, изучены и систематизированы данные по энергетическому хозяйству Мурманской, Архангельской областей, Карельской и Коми АССР и всему Европейскому Северу СССР в целом; определены технико-экономические характеристики и намечены основные направления развития энергетики региона, разработана программа перспективного развития энергетики Мурманской области до 2000 г., определяющая объем и сроки расширения Кольской АЭС.

На базе данных натуральных наблюдений и их обработки составлен ветроэнергетический кадастр Кольского полуострова.

На берегу Баренцева моря, в поселке Дальние Зеленцы, создан ветроэнергетический полигон (руководитель Евгений Иванович Куклин), позволяющий проводить в натуральных условиях исследование работы ветроэнергетических установок при больших скоростях ветра и неблагоприятных метеорологических условиях. Проведены наладка и длительные испытания ветроагрегатов «Беркут», «Ветерок» и АВЭУ (1-4)-6, даны рекомендации по совершенствованию конструкции ветроагрегатов и комплексного оборудования.

Создан ветроэнергетический кадастр Европейского Севера СССР, составлена карта распределения среднегодовых скоростей ветра и выявлены районы, наиболее перспективные для использования энергии ветра [18].

Разработаны предложения по созданию опытно-промышленной ветроэлектростанции мощностью 1000 кВт на берегу Баренцева моря, в районе поселка Дальние Зеленцы, и по созданию комплекса ветроэнергетических установок общей мощностью 100 МВт на побережье Баренцева моря, в районе действующих гидроэлектростанций, с оценкой возможных технико-экономических показателей, определены условия эффективного применения ветроэлектрических установок (ВЭУ) для целей электро- и теплоснабжения, показано, что их использование в прибрежных районах обеспечивает снижение удельных приведенных затрат на 10–20 % и вытеснение органического топлива до 50–70 %.

Проведено предварительное исследование техногенного загрязнения Йокостровской и Бабинской Имандры и даны предварительные рекомендации по охране водоема. Оценено современное состояние южной части озера Имандра в связи с интенсивным и многофакторным антропогенным воздействием на его водные массы, донные отложения и биоценозы. Выявлены последствия такого воздействия. На этой основе даны рекомендации по дальнейшему рациональному хозяйственному использованию озера и его охране.

На основе статистического материала определены основные количественные зависимости по влиянию температурного и ветрового режимов района Кольского полуострова и смежных районов Карельской и Архангельской областей на теплотери отапливаемых помещений и даны практические рекомендации.

Изучены технические и энергетические предпосылки повышения эффективности использования рек Восточной Лицы, Харловки и Рынды и разработаны практические рекомендации по гидротехническому строительству на этих реках, уточнена схема энергетического использования объединенного стока трех рек. Дана характеристика современного состояния использования гидроэнергетических ресурсов Севера европейской части СССР и перспектив их дальнейшего освоения с учетом новых системных взглядов на использование гидравлических, гидроаккумулирующих и приливных электростанций.

Разработаны новые схемы грозозащиты с выносом разрядников на линию для подстанций, расположенных в районах с высоким удельным сопротивлением грунта, позволяющие существенно сократить расходы металла на изготовление дорогостоящих подходов и грозозащитных заземлений при одновременном повышении их надежности. Проведены исследования грозозащиты линий электропередачи (ЛЭП) 330 кВ на основе расчетов и натуральных измерений эффективности средств защиты, разработаны рекомендации о пересмотре действующих норм по грозозащите высоковольтных сетей в районах с высоким удельным сопротивлением грунта [19].

Исследованы перспективы применения гидроаккумулирования в энергосистемах Европейского Севера СССР. Определена оптимальная структура генерирующих мощностей с участием гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) мощностью 300–500 МВт, а на отдаленную перспективу — межсистемных ГАЭС мощностью более 1000 МВт. Найдены площадки для их строительства, разработаны их схемы и оценены энергоэкономические показатели.

Разработаны концепция создания подземных атомных электростанций (АЭС), предусматривающая рациональное использование защитных свойств скальных пород (грунта), и комплекс принципиальных решений стационарных систем, учитывающих специфические условия подземного исполнения [20].

Рассмотрены перспективы развития теплоснабжения района Зашеек — Кандалакша от Кольской АЭС. Установлена технико-экономическая эффективность теплоснабжения района Кандалакша — Полярные Зори от Кольской АЭС с использованием однотрубного транспорта тепла и пиковых котельных района.

На основе систематизированных и обобщенных данных выполнен анализ топливно-энергетического баланса и надежности энергоснабжения Мурманской области. Выявлены особенности предшествующего развития энергетического хозяйства области, сформулированы основные научно-технические и практические проблемы и разработаны рекомендации по его дальнейшему развитию в условиях проведения активной энергосберегающей политики. Разработана программа экономии топливно-энергетических ресурсов Мурманской области «Энергия».

За рассматриваемый временной отрезок (семнадцать лет) было защищено четыре диссертации на соискание ученой степени кандидата наук: А. П. Панин (1979), Ю. М. Невретдинов (1980), Б. Г. Баранник (1983), В. А. Минин (1986).

Энергетические исследования 1990–2004 гг.

Постановлением Центрального Комитета КПСС и Совета Министров СССР «О мерах по ускорению экономического и социального развития Мурманской области на 1988–1990 годы и в период до 2000 года» (объявлено Постановлением Президиума АН СССР от 27 сентября 1988 г. № 1 113 «Задачи и перспективы развития Кольского научного центра АН СССР»), постановлением Президиума АН СССР № 1153 от 18 августа 1990 г. и Приказа по Кольскому научному центру № 1451-к от 14 ноября 1990 г. на базе Отдела энергетики был образован Институт физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра АН СССР. Директором — организатором Института назначен кандидат технических наук Александр Александрович Папин.

Основные направления научных исследований Института: исследование и обоснование экологически и социально эффективных путей развития энергетики с учетом специфики региона в новых условиях хозяйствования; исследования проблем надежного и эффективного электроснабжения потребителей в специфических условиях Севера и применения электроэнергии в технологиях добычи и переработки минерального сырья.

Решением Ученого совета от 20 февраля 1991 г. (протокол № 1) и приказом по Институту № 17 от 26 февраля 1991 г. утверждена следующая структура Института:

1. Отдел рационального использования энергии (№ 10):
 - лаборатория промышленной энергетики (№ 11);
 - лаборатория социальных проблем энергосбережения (№ 12).
2. Отдел комплексных проблем энергоснабжения (№ 20):
 - лаборатория топливно-энергетического комплекса (№ 21);
 - лаборатория экологических проблем энергетики (№ 22);
 - лаборатория нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (№ 23).
3. Отдел электрофизики (№ 30):
 - лаборатория перенапряжений и изоляции (№ 31);
 - лаборатория электрофизических технологий (№ 32);
 - высоковольтная испытательная лаборатория (№ 33).
4. Лаборатория применения математических методов и вычислительного эксперимента в энергетике (№ 40).

По состоянию на 1 декабря 1991 г. в Институте числилось 62 человека, в том числе: один доктор технических наук, одиннадцать кандидатов технических наук, четырнадцать научных сотрудников, семнадцать инженеров, шесть стажеров-исследователей, четыре лаборанта, один экономист, трое рабочих.

28 декабря 1992 г. исполняющим обязанности директора назначен кандидат технических наук Владислав Романович Елохин, а 17 июля 2000 г. в должности директора был утвержден доктор технических наук Борис Васильевич Ефимов.

Ниже перечислены важнейшие научные достижения ИФТПЭС КНЦ РАН этого периода.

Разработан прогноз развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) запада Европейского Севера СССР на период до 2015 г., определяющий объемы энергопотребления областей региона по пятилеткам и принципиальные решения по их покрытию. Даны конкретизированные рекомендации по развитию ТЭК Мурманской области и Республики Карелия до 2005 г.

Выявлены благоприятные предпосылки развития газификации Мурманской области от месторождений природного газа на шельфе Баренцева моря. Показано возможное потребление газа в Кольско-Карельском регионе. Рассмотрены варианты газификации региона для оценки величины удельных приведенных затрат [21].

Разработан технико-экономический доклад о реконструкции Восточной и Южной котельных города Мурманска с установкой предвключенных газотурбинных установок (ГТУ). Показана целесообразность такой реконструкции, позволяющей повысить надежность электроснабжения котельных и получить дополнительную мощность в энергосистеме [22].

Выполнен анализ топливно-энергетического баланса ПО «Апатит» и определены научно обоснованные удельные расходы электроэнергии в зависимости от технологических факторов [23].

Дана прогнозная оценка потребления топлива, электро- и теплоэнергии на перспективу, а также оценка потребности в природном газе и эффективности его применения.

Разработаны рекомендации по защите кабельной линии управления и связи от влияния внешних электромагнитных полей, позволяющие при проектировании кабельных линий создавать комплекс защитных мероприятий, обеспечивающих существенное повышение надежности передачи информации по этим линиям.

Разработан каскадный принцип защиты подстанций от атмосферных перенапряжений и конкретные схемные решения в зависимости от класса напряжения и условий выполнения защитных заземлений. Результаты включены в «Электротехнический справочник» и используются при эксплуатации электрических сетей. Создана новая методика, алгоритм и программа расчета вероятного числа отключений линий передачи по грозovým причинам с учетом специфических условий северных регионов.

Создан научно-исследовательский лабораторный комплекс для импульсных испытаний на грозостойкость проводов и грозозащитных тросов ЛЭП, а также линий волоконно-оптической связи, размещенных на тросах ЛЭП, позволяющий впервые в стране моделировать одновременное развитие основных стадий тока линии: главный разряд и продолжительный сопровождающий ток во всем диапазоне реальных грозových разрядов [24].

Разработана методика и создана экспериментальная установка для исследования грозостойкости проводов и тросов ЛЭП, а также оптико-волоконных линий связи, подвешенных на опорах. Получены новые теоретические и экспериментальные данные, позволяющие оптимизировать конструкции и параметры таких линий и решать ряд актуальных задач по обеспечению высокой надежности связи по воздушным оптико-волоконным линиям с металлической несущей частью.

Выполнено обоснование расположения и параметров возможных ГЭС на малых реках Оленке, Лотте, Ноте, Тумче, Умбе, Пиренге по энергоэкологическим критериям. Определены виды и степень трансформации окружающей среды в зонах влияния этих ГЭС и их водохранилищ. Выполнена оценка перспектив использования энергии ветра, малых рек, солнечной, приливной, волновой энергии и других источников.

Разработан «Атлас ветра Кольского полуострова», который пополнил «Атлас ветра Европы» [25].

Выявлены предпосылки развития автономной и системной ветроэнергетики в регионе и предложены первоочередные объекты строительства. Рекомендовано выполнение конкретного демонстрационного проекта с международным финансированием — сооружение демонстрационной ветроэнергетической установки Wincon 200 на территории гостиничного комплекса «Огни Мурманска». Работа выполнялась в рамках научно-технического сотрудничества с норвежским обществом охраны природы (Norges Naturvernforbundet), направленного на развитие ветроэнергетики в Баренц-регионе.

Для работ по электроимпульсной дезинтеграции руд перспективных месторождений Кольского полуострова и для геологических исследований был создан технологический стенд ЭИ-дезинтеграции материалов. Выполнены (совместно с ГИ КНЦ РАН) исследования дезинтеграции платиносодержащих

руд, подтвердившие перспективность способа для минералогических исследований и разработки оптимальной технологической схемы обогащения руд. Опробована новая методика подготовки проб для геохронологических исследований с использованием ЭИ-дезинтеграции материалов [26].

За рассматриваемый временной отрезок (пятнадцать лет) было защищено две диссертации на соискание ученой степени кандидата наук: А. Н. Данилин (1990), Н. М. Кузнецов (1993) — и две диссертации на соискание ученой степени доктора наук: В. Р. Елохин (1993), Б. В. Ефимов (1999).

Энергетические исследования с 2004 г. по настоящее время

Постановлением Президиума КНЦ РАН № 2 от 25 марта 2004 г. в составе КНЦ РАН образовано обособленное научное подразделение — филиал КНЦ РАН — Центр физико-технических проблем энергетики Севера (ЦФТПЭС КНЦ РАН) и утверждено Положение о филиале.

Постановлением Президиума РАН от 17 февраля 2004 г. № 54 и постановлением Президиума КНЦ РАН от 10 июня 2004 г. № 5 ИФТПЭС КНЦ РАН был присоединен к КНЦ РАН в форме филиала.

Основные направления научной деятельности были зафиксированы Положением о филиале: а) разработка путей эффективного развития и функционирования энергетических систем в условиях Арктики, включая проблемы энергобезопасности, энергосбережения и рационального освоения природных энергоресурсов; б) исследование физико-технических и экологических проблем энергетики Севера, электрофизических свойств материалов и развитие высоковольтных электротехнологий для электроразведки, добычи и переработки минерального сырья.

По состоянию на 15 декабря 2004 г. в ЦФТПЭС КНЦ РАН работали 43 человека: два доктора технических наук, восемь кандидатов технических наук, один старший научный сотрудник без ученой степени, два научных сотрудника, один младший научный сотрудник, тринадцать инженеров, пять стажеров-исследователей, шесть лаборантов, пять работников АУП, канцелярии, отдела кадров и бухгалтерии.

Приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 457 от 17 мая 2022 г. была утверждена новая редакция Устава Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», в которой наше подразделение именуется как Центр физико-технических проблем энергетики Севера — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ЦЭС КНЦ РАН).

По состоянию на 10 декабря 2021 года в ЦЭС КНЦ РАН работал 31 сотрудник, из них: шестнадцать научных сотрудников, пять инженеров, четыре лаборанта-исследователя, четверо работников АУП, канцелярии, отдела кадров и бухгалтерии, двое рабочих.

Перечислим некоторые важнейшие научные достижения этого периода.

Разработан сводный технико-экономический баланс Мурманской области на основе комплексного (системного) подхода к региональным энергетическим задачам, предусматривающего непротиворечивость их технико-экономических решений, направленных на обеспечение необходимых условий для реализации целевого сценария инновационного развития области в указанной перспективе и учитывающих последствия экономического кризиса.

Рассмотрены перспективы развития Кольской энергосистемы с учетом дальнейшего развития атомной энергетики и освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения на шельфе Баренцева моря.

Обоснована необходимость продления сроков эксплуатации блоков Кольской АЭС по критериям надежности электроснабжения этих регионов. Разработаны технико-экономические подходы к формированию структуры гибридных электро- и теплоснабжающих комплексов в районах Севера, располагающих повышенным потенциалом энергии ветра.

На северном побережье Кольского полуострова, вблизи каскадов Серебрянских и Териберских ГЭС, выявлены перспективные площадки для сооружения ветропарков мощностью от 10–15 до 200 МВт и последующего крупномасштабного использования ветровой энергии в Кольской электроэнергетической системе. Разработан метод включения ветропарков в график электрической нагрузки энергосистемы, содержащей ГЭС, оценены долгосрочные режимы совместной работы ГЭС

с крупными ветропарками для различных условий по водности года и потенциалу ветра. Выявленные площадки открывают перспективы последовательного развития системной ветроэнергетики в прибрежных арктических районах страны.

На примере Мурманской области выявлены особенности топливо- и энергоснабжения децентрализованных потребителей энергии, оценены ресурсы местных возобновляемых источников (солнца, ветра, гидроэнергии малых рек, морских приливов и волн), определены приоритеты и масштабы их возможного использования в условиях Севера, разработаны методические подходы к оценке технико-экономической эффективности применения ветроэнергетических установок и малых ГЭС. Выполнена оценка потенциала энергосбережения в сфере теплоснабжения потребителей Мурманской области, показаны основные направления его эффективного использования, в том числе вовлечение в оборот нетрадиционных и возобновляемых источников энергии [27].

Выявлены причины возникновения высокочастотных (ВЧ) перенапряжений и предложены мероприятия по защите от ВЧ-перенапряжений оборудования высоковольтных подстанций. Разработан метод защиты от ВЧ-перенапряжений, основанный на установке на шинах подстанций продольных защитных устройств, обеспечивающих поглощение энергии ВЧ-колебаний [28, 29].

Для повышения грозоупорности и защиты от ВЧ-перенапряжений электроэнергетических сетей разработана экспериментально-аналитическая методика синтеза схем замещения сопротивлений заземлений опор линий электропередачи и локальных сопротивлений заземлений оборудования подстанций в микросекундном диапазоне времен.

Создана система мониторинга геоиндуктированных токов в нейтралях трансформаторов системообразующих подстанций высших классов напряжения ОАО «Колэнерго», предназначенная для изучения влияния геомагнитных бурь на энергосистемы Северо-Запада России. Данные длительного мониторинга служат основой для оценки устойчивости оборудования энергосистемы к геомагнитным воздействиям, разработки системы предупреждения развития аварий, вызываемых геомагнитными бурями, и разработки средств защиты от них энергосистем Северо-Запада России.

Выполнены комплексные исследования влияния железнодорожных тяговых сетей на переменном токе на линии электропередач энергосистемы, позволившие определить распределение обратных токов между рельсовыми путями и землей, зависящее от электрических параметров грунта. Выполненные измерения позволили разработать математическую модель электромагнитной связи контуров токов железной дороги и высоковольтных линий, определить уровень наведенных напряжений на линиях и разработать рекомендации по защите персонала энергосистемы, производящего ремонт на линиях.

Разработан комплексный подход к проблеме энергосбережения и экономии электроэнергии в распределительных электрических сетях промышленных предприятий. Показано, что внедрение предложенного комплекса энергосберегающих малозатратных мероприятий позволит для конкретных предприятий Северо-Западного региона России существенно уменьшить плату за электроэнергию.

Для сверхглубинного зондирования литосферы Балтийского щита, а также исследования океана, ионосферы и магнитосферы Земли в сотрудничестве с ГИ КНЦ РАН впервые в мировой практике разработан генераторно-измерительный комплекс FENICS на основе генератора «Энергия-1» мощностью 100 кВт и высокочувствительной семиканальной цифровой измерительной станции СЧЗ-7, а также выполнены тензорные глубинные электромагнитные зондирования с двумя взаимно ортогональными промышленными ЛЭП на удалениях до 800 км от источника в частотном диапазоне 0,1–200 Гц. Создан мобильный КНЧ-СНЧ-генератор нового поколения «Энергия-2» мощностью до 200 кВт, предназначенный для сверхглубинного зондирования земной коры. В ходе проведения эксперимента «FENICS-2009» сигналы генератора зафиксированы на удалении 2150 км от излучателя в диапазоне частот 0,642–38,22 Гц. Разработана инновационная технология электроразведочных работ с применением контролируемых источников и промышленных ЛЭП для прогнозно-поисковых изысканий на нефть и газ в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа [30].

Развита теория распространения грозových перенапряжений в схемах замещения многопроводных линий и подстанций с учетом импульсных входных сопротивлений заземлений защитных устройств. Выполнено экспериментальное и численное исследование формирования

атмосферных перенапряжений на основном оборудовании, установленном на подстанциях, расположенных в специфических условиях Крайнего Севера. Оценены показатели грозоупорности электроэнергетического оборудования с учетом всех основных влияющих факторов. Показано, что действующие нормативные документы по грозозащите подстанций от волн, набегających с линий электропередачи, нуждаются в существенной переработке.

Впервые выполнены комплексные теоретические и экспериментальные исследования развития атмосферных перенапряжений на шинах и заземляющем устройстве действующей подстанции 330 кВ при набегании электромагнитного импульса с ЛЭП. Полученные результаты доказывают необходимость учета импульсных характеристик сопротивления заземления защитных аппаратов при анализе надежности грозозащиты подстанционного оборудования в условиях высокого удельного сопротивления грунта.

Сформирована база данных для оценки перспектив внедрения нетрадиционных и возобновляемых источников в энергетику региона. Собрана информация по объемам и структуре производства и потребления электрической и тепловой энергии в Мурманской области. Выполнена оценка потенциала энергосбережения в сфере теплоснабжения потребителей Мурманской области, показаны основные направления его эффективного использования, в том числе вовлечение в оборот нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Разработана математическая модель схемы теплоснабжения потребителей Крайнего Севера и Арктики, расположенных в районах с повышенным потенциалом ветра, включающая источники на органическом топливе, ветроэнергетические установки и аккумуляторы тепловой энергии, позволяющая отслеживать режимы работы такой комплексной схемы теплоснабжения в зависимости от различных климатических данных.

Выполнен цикл экспериментальных исследований нелинейных процессов в грунтах с низкой проводимостью при имитации разрядов молнии в элементы заземляющих устройств. Процессы растекания импульсных токов и распределения потенциалов в грунте изучались зондовым и оптическим методами при напряженностях электрического поля, соответствующих реальным токам молнии. Полученные экспериментальные результаты позволят уточнить существующую модель ионизации грунта при протекании больших импульсных токов через заземлители.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена энергетическая эффективность электроимпульсного разрушения геоматериалов с помощью новых технических средств генерирования импульсов на базе высокочастотных зарядных устройств и импульсных трансформаторных схем. Показана возможность кардинального улучшения удельных массогабаритных и энергетических характеристик электроимпульсных технологических установок, что открывает путь к широкой практической реализации этих установок при решении различных научных, технических и технологических задач. На основе изучения электрофизических и электротехнических аспектов получения и применения низкотемпературной плазмы импульсного электрического пробоя твердых тел предложены варианты схем совместной работы двух импульсных источников, отличающихся уровнем напряжения и энергии для создания энергоэффективной техники генерирования высоковольтных импульсов электроимпульсного способа разрушения геоматериалов.

Разработано и запатентовано портативное устройство для измерения частотно-зависимых электрических параметров грунта в частотном диапазоне токов молнии [31].

Создан макет прибора для измерения импульсных характеристик заземляющих устройств (ЗУ). Устройство предназначено для экспериментального определения и исследования стационарного сопротивления и импульсных характеристик ЗУ опор ЛЭП с грозозащитным тросом и без него, импульсных характеристик ЗУ распределительных устройств и защитных аппаратов. В ходе выполнения работ по разделу было разработано программное обеспечение, обладающее необходимыми средствами для решения задачи компьютерного моделирования ЗУ опор ЛЭП с учетом вертикальных и горизонтальных неоднородностей грунта в условиях северной климатической зоны [32].

Обоснован выбор приоритетных направлений изменения структуры энергопотребления региона за счет внедрения энергосберегающих мероприятий, определены целевые показатели для оценки их энергоэффективности. Сформулированы рекомендации по выбору энергосберегающих мероприятий в жилищно-коммунальной и бюджетной сферах и для оценки энергоэффективности внедряемых мероприятий.

Выполнен анализ состояния энергосбережения на основе динамики валового регионального продукта, приведен обзор достигнутых результатов в области энергетической эффективности по регионам Арктической зоны Российской Федерации. Проанализирован ввод ключевых энергоэффективных технологий по арктическим регионам: внедрение индивидуальных тепловых пунктов с автоматическим погодным регулированием в зданиях бюджетного сектора и многоквартирных домах; энергоэффективные источники света в зданиях бюджетного сектора, а также в уличном и дорожном хозяйстве; энергоэффективность зданий, эксплуатируемых организациями бюджетной сферы. Разработаны методики расчета: 1) оценки экономической эффективности инвестиций при внедрении наилучших доступных технологий; 2) экономической эффективности инвестиций при внедрении автоматизированных тепловых пунктов в районах Северо-Западного федерального округа Арктической зоны Российской Федерации, выполнен расчет экономии энергии при внедрении таких пунктов для автоматизированного управления отопительной нагрузкой. Показаны направления потенциалов энергосбережения и развития энергетики Мурманской области, которая приобретает более распределенный характер. Для снижения удельного расхода в жилищно-коммунальной сфере и бюджетных зданиях необходимо внедрение индивидуальных тепловых пунктов с автоматическим погодным регулированием, увеличение доли строительства и реконструкции многоквартирных домов и зданий с повышенным классом энергетической эффективности, установка энергоэффективного светового оборудования [33].

Совместно с ГИ КНЦ РАН модернизирован масс-спектрометр МИ-1201ИГ путем усовершенствования электронных блоков и программного обеспечения, что позволило расширить динамический диапазон и улучшить стабильность работы измерительной системы, повысить разрешающую способность, точность, надежность и производительность измерений изотопного состава газа. Разработанные программы позволили автоматизировать процесс измерений и свести к минимуму участие оператора масс-спектрометра в эксперименте.

Создана уникальная система автоматического оповещения о возможном поражении молнией объектов наземной технической инфраструктуры, попавших в зону действия грозового разряда, на основе общей базы данных оборудования энергосистемы Кольского региона и пополняемой в реальном времени базы данных молниевых разрядов, зарегистрированных в Северо-Западном регионе России. Внедрение этой системы на энергетических предприятиях позволит значительно сократить время поиска поврежденных молнией элементов электрической сети.

Разработан эффективный метод дезинтеграции абразивных изделий из электрокорунда электроимпульсным воздействием в жидкой диэлектрической среде, имеющий значительные преимущества в сравнении с традиционными механическими методами разрушения.

За рассматриваемый временной отрезок (девятнадцать лет) было защищено семь диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук: В. Н. Селиванов (2004), С. Н. Туинова (2005), М. В. Якубович (2007), В. В. Колобов (2008), А. С. Карпов (2010), О. В. Залесова (2018), Д. В. Куклин (2018).

Список источников

1. Энергетические исследования в Кольском научном центре РАН. 1950–2000 годы. Краткий исторический очерк. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2000. 88 с.
2. Степанов И. Р. Итоги деятельности отдела энергетики за 25 лет и основные задачи дальнейших исследований // Вопросы энергетики Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1975. С. 9–14.
3. Водопад раздора // Государственный архив Мурманской области ГОКУ ГАМО. URL: <https://www.murmanarchiv.ru/exhibitions-events/2009-06-08-10-18-49/1575-2020-10-09-05-31-16> (дата обращения: 01.09.2022).
4. Григорьев А. А. Физико-географические предпосылки хозяйственного освоения Кольского полуострова // Госплан СССР. Материалы к I Всесоюзной конференции по размещению производительных сил СССР во 2 пятилетии. М.; Л.: Гос. экон. изд., 1932. 12 с.

5. Григорьев С. В. Летопись материалов по истории науки и техники в Карелии и на Кольском полуострове // Известия Карельского и Кольского филиалов академии наук СССР. 1958. № 2. С. 173–175.
6. Григорьев С. В. Летопись по истории науки и техники (Карелия и Кольский п-ов) // Известия Карельского и Кольского филиалов академии наук СССР. 1959. № 1. С. 156–158.
7. Шабалина О. В., Казакова К. С. Персональный фонд гидроэнергетика С. В. Григорьева Музея-архива истории изучения и освоения Европейского Севера ЦГП КНЦ РАН // Труды Кольского научного центра РАН. Гуманитарные исследования. Вып. 21. 2021. Т. 12, № 4. С. 28–36.
8. Копылов Н. А. Белый уголь в Северной области России // Естественные производительные силы России. Белый уголь. Северная область / Комис. по изучению естественных производительных сил России, сост. при Рос. акад. наук. Т. 2. 1. Пб.: 2-я Гос. тип., 1921. 99 с.
9. Рихтер Г. Д. Результаты геоморфологической рекогносцировки в бассейнах рр. Варзуги и Поной (Мурманский округ) // Труды ин-та физической географии. Вып. 19. М.; Л., 1936. С. 49–120.
10. Григорьев С. В. Конференция по энергетике Крайнего Северо-Запада СССР // Известия Карельского и Кольского филиалов академии наук СССР. Петрозаводск: Государственное издательство КАССР, 1958. № 4. С. 189–191.
11. Литинская К. Д. Памяти Сергея Владимировича Григорьева // Вопросы энергетики Кольского полуострова: сб. ст. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1975. С. 165–169.
12. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 1. Реки Восточная Лица и Харловка / В. В. Богданов, И. Т. Изотова, К. Н. Балашов, А. П. Панин. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1958. 170 с.
13. Богданов В. В., Балашов, К. Н., Панин А. П. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 2. Река Поной. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1958. 92 с.
14. Панин А. П. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 3. Гидроэнергетические ресурсы Кольского полуострова и основные принципы их использования. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1960. 147 с.
15. Богданов В. В., Балашов К. Н., Панин А. П. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 4. Реки Варзина и Дроздовка. Л.: Изд. АН СССР, 1960. 83 с.
16. Куклин Е. И. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 5. Река. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1961. 93 с.
17. Панин А. П. Отопительный баланс районов Севера. Л.: Наука, 1983. 200 с.
18. Зубарев В. В., Минин В. А., Степанов И. Р. Использование энергии ветра в районах Севера: Состояние, условия эффективности, перспективы. Л.: Ленинградское отделение издательства «Наука», 1989. 208 с.
19. Костенко М. В., Невретдинов Ю. М., Халилов Ф. Х. Грозозащита электрических сетей в районах с высоким удельным сопротивлением грунта. Л.: Наука, 1984. 112 с.
20. Степанов И. Р. Атомная теплофикация в районах Севера. Л.: Наука, 1984. 174 с.
21. Оценка перспектив газификации Кольско-Карельского региона / И. Р. Степанов, Б. Г. Баранник, Н. М. Кузнецов, Н. А. Зарудняя, Н. В. Калинина, Е. А. Токарева. Депонированная рукопись 03.01.1990, № ПН 03001.
22. Степанов И. Р. Применение парогазовых установок в районах Севера. СПб.: Наука, 1992. 176 с.
23. Кузнецов Н. М., Щуцкий В. И. Рациональное электропотребление на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 1997. 211 с.
24. Ефимов Б. В. Грозовые волны в воздушных линиях. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2000. 134 с.
25. Атлас ветров России. М.: Можайск-Терра, 2000. 560 с.
26. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. 321 с.
27. Баранник Б. Г., Коновалова О. Е., Минин В. А. Перспективы совершенствования энергетического хозяйства в районах Севера за счет использования возобновляемых источников энергии. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2011. 154 с.

28. Данилин А. Н., Ефимов Б. В., Колобов В. В. Ограничение перенапряжений на подстанциях при коммутациях разъединителями. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2007. 135 с.
29. Пат. 2284622 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 9/04, Н 01 С 8/04. Устройство защиты от перенапряжений / Ефимов Б. В., Данилин А. Н., Колобов В. В.; заявитель и патентообладатель Кольский научный центр Российской академии наук (RU). № 2005105918/09; заявл. 02.03.2005; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27. 11 с.
30. Колобов В. В., Баранник М. Б., Жамалетдинов А. А. Генераторно-измерительный комплекс «Энергия» для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон. СПб.: СОЛЮ, 2013. 240 с.
31. Пат. 193419 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/20, G 01 N 33/24. Устройство для измерения электрических параметров грунтов с учетом их частотной зависимости / Куклин Д. В.; заявитель и патентообладатель Кольский научный центр Российской академии наук (RU). № 2019116332; заявл. 27.05.2019; опубл. 29.10.2019, Бюл. № 31. 13 с.
32. Пат. 2726043 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/00. Способ определения значения стационарного сопротивления заземляющего устройства опор воздушных линий электропередачи без отсоединения грозозащитного троса и устройство для его реализации / Колобов В. В., Селиванов В. Н., Баранник М. Б.; заявитель и патентообладатель Кольский научный центр Российской академии наук (RU). № 2019143484; заявл. 09.12.2019; опубл. 08.07.2020, Бюл. № 19. 25 с.
33. Кузнецов Н. М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2020. 92 с.

References

1. *Jenergeticheskie issledovanija v Kol'skom nauchnom centre RAN. 1950–2000 gody. Kratkij istoricheskij ocherk* [Energy research at the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 1950–2000. A brief historical sketch]. Apatity, Publisher KSC RAS, 2000, 88 p. (In Russ.).
2. Stepanov I. R. Itogi dejatel'nosti otdela jenergetiki za 25 let i osnovnye zadachi dal'nejshih issledovanij [Results of the activities of the Energy Department for 25 years and the main tasks of further research]. *Voprosy jenergetiki Kol'skogo poluostrova* [Energy issues of the Kola Peninsula]. Apatity, Kola branch of the AS USSR, 1975, pp. 9–14. (In Russ.).
3. *Vodopad razdora* [Waterfall of Discord]. (In Russ.). Available at: <https://www.murmanarchiv.ru/exhibitions-events/2009-06-08-10-18-49/1575-2020-10-09-05-31-16> (accessed 01.09.2022).
4. Grigor'ev A. A. Fiziko-geograficheskie predposylki hozjajstvennogo osvoenija Kol'skogo poluostrova [Physical and geographical prerequisites for the economic development of the Kola Peninsula]. *Gosplan SSSR. Materialy k I Vsesojuznoj konferencii po razmeshheniju proizvoditel'nyh sil SSSR vo 2 pjatileti* [Gosplan of the USSR. Materials for the I All-Union Conference on the placement of the productive forces of the USSR in the 2nd five-year period]. Moscow, Leningrad, State Economic Publication, 1932, 12 p. (In Russ.).
5. Grigor'ev S. V. Letopis' materialov po istorii nauki i tehniki v Karelii i na Kol'skom poluostrove [Chronicle of materials on the history of science and technology in Karelia and on the Kola Peninsula]. *Izvestija Karel'skogo i Kol'skogo filialov akademii nauk SSSR* [Proceedings of the Karelian and Kola branches of the USSR Academy of Sciences], 1958, no. 2, pp. 173–175. (In Russ.).
6. Grigor'ev S. V. Letopis' po istorii nauki i tehniki (Karelija i Kol'skij p-ov) [Chronicle of the history of science and Technology (Karelia and Kola Peninsula)]. *Izvestija Karel'skogo i Kol'skogo filialov akademii nauk SSSR* [Proceedings of the Karelian and Kola branches of the USSR Academy of Sciences], 1959, no. 1, pp. 156–158. (In Russ.).
7. Shabalina O. V., Kazakova K. S. Personal'nyj fond gidrojenergetika S. V. Grigor'eva Muzeja-arhiva istorii izuchenija i osvoenija Evropejskogo Severa CGP KNC RAN [S. V. Grigoriev's Personal Fund of the Hydropower Museum-Archive of the History of the Study and Development of the European North of BCH KSC RAS]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Gumanitarnye issledovanija* [Transactions of the Kola Science Centre. Humanitarian Studies], 2021, vol. 12, no. 4, pp. 28–36. (In Russ.).

8. Kopylov N. A. Belyj ugol' v Severnoj oblasti Rossii [White coal in the Northern region of Russia]. *Estestvennye proizvoditel'nye sily Rossii. Belyj ugol'. Severnaja oblast'* [The natural productive forces of Russia. White coal. Northern region]. Komis. po izucheniju estestvennyh proizvoditel'nyh sil Rossii, sost. pri Ros. akad. nauk, vol. 2. 1. Petersburg, 2-ja Gos. tip., 1921, 99 p. (In Russ.).
9. Rihter G. D. Rezul'taty geomorfologicheskoj rekognoscirovki v bassejnah rr. Varzugi i Ponoja (Murmanskij okrug) [Results of geomorphological reconnaissance in the basins of the Varzuga and Ponoj districts (Murmansk District)]. *Trudy in-ta fizicheskoy geografii* [Transactions of the Institute of Physical Geography], Issue 19. Moscow, Leningrad, 1936, pp. 49–120. (In Russ.).
10. Grigor'ev S. V. Konferencija po jenergetike Krajnego Severo-Zapada SSSR [Conference on Energy of the Extreme Northwest of the USSR]. *Izvestija Karel'skogo i Kol'skogo filialov akademii nauk SSSR* [Proceedings of the Karelian and Kola branches of the USSR Academy of Sciences]. Petrozavodsk, Gosudarstvennoe izdatel'stvo KASSR, 1958, no. 4, pp. 189–191. (In Russ.).
11. Litinskaja K. D. Pamjati Sergeja Vladimirovicha Grigor'eva [In commemoration of Sergej Vladimirovich Grigor'ev]. *Voprosy jenergetiki Kol'skogo poluostrova* [Kola Peninsula Energy Issues]. Apatity, Kol'skij filial AN SSSR, 1975, pp. 165–169. (In Russ.).
12. Bogdanov V. V., Izotova I. T., Balashov K. N., Panin A. P. *Vodnojenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 4. Reki Vostochnaja Lica i Harlovka* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 4. Varzina and Drozdovka rivers]. Moscow, Leningrad, Pbl. AS USSR, 1958, 170 p. (In Russ.).
13. Bogdanov V. V., Balashov K. N., Panin A. P. *Vodnojenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 2. Reka Ponoj* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 2. The Ponoj River]. Moscow, Leningrad, Pbl. AS USSR, 1958, 92 p. (In Russ.).
14. Panin A. P. *Vodnojenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 3. Hidrojenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova i osnovnye principy ih ispol'zovanija* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 3. Hydropower resources of the Kola Peninsula and the basic principles of their use]. Moscow, Leningrad, Pbl. AS USSR, 1960, 147 p. (In Russ.).
15. Bogdanov V. V., Balashov K. N., Panin A. P. *Vodnojenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 4. Reki Varzina i Drozdovka* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 4. Varzina and Drozdovka rivers]. Moscow, Leningrad, Pbl. AS USSR, 1960, 83 p. (In Russ.).
16. Kuklin E. I. *Vodnojenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 5. Reka Umba* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 5. The Umba River]. Moscow, Leningrad, Pbl. AS USSR, 1961, 93 p. (In Russ.).
17. Panin A. P. *Otopitel'nyj balans rajonov Severa* [Heating balance of the districts of the North]. Leningrad, Nauka, 1983, 200 p. (In Russ.).
18. Zubarev V. V., Minin V. A., Stepanov I. R. *Ispol'zovanie jenergii vetra v rajonah Severa: Sostojanie, uslovija jeffektivnosti, perspektivy* [The use of wind energy in the North: The state, conditions of efficiency, prospects]. Leningrad, Leningradskoe otdelenie izdatel'stva "Nauka", 1989, 208 p. (In Russ.).
19. Kostenko M. V., Nevretdinov Ju. M., Halilov F. H. *Grozozashhita jelektricheskijh setej v rajonah s vysokim udel'nym soprotivleniem grunta* [Lightning protection of electrical networks in areas with high ground resistivity]. Leningrad, Nauka, 1984, 112 p. (In Russ.).
20. Stepanov I. R. *Atomnaja teplofikacija v rajonah Severa* [Nuclear heating in the regions of the North]. Leningrad, Nauka, 1984, 174 p. (In Russ.).
21. Stepanov I. R., Barannik B. G., Kuznecov N. M., Zarudnjaja N. A., Kalinina N. V., Tokareva E. A. *Ocenka perspektiv gazifikacii Kol'sko-Karel'skogo regiona* [Assessment of prospects for gasification of the Kola-Karelian region]. Deponirovannaja rukopis' [deposit manuscript]. 03.01.1990, no. PN 03001. (In Russ.).
22. Stepanov I. R. *Primenenie parogazovyh ustanovok v rajonah Severa* [Application of combined-cycle gas installations in the North]. Saint Petersburg, Nauka, 1992, 176 p. (In Russ.).
23. Kuznecov N. M., Shhuckij V. I. *Racional'noe jelektropotreblenie na gornodobyvajushhijh i gorno-obogatitel'nyh predpriyatijah* [Rational power consumption at mining and processing enterprises]. Apatity, Kol'skij nauchnyj centr Rossijskoj akademii nauk, 1997, 211 p. (In Russ.).
24. Efimov B. V. *Grozovye volny v vozdushnyh linijah* [Thunderstorm waves in overhead lines]. Apatity, Pbl. KNC RAN, 2000, 134 p. (In Russ.).

25. *Atlas ветров России* [Atlas of the winds of Russia]. Moscow, Mozhajsk-Terra, 2000, 560 p. (In Russ.).
26. Kurec V. I., Usov A. F., Cukerman V. A. *Jelektroimpul'snaja dezintegracija materialov* [Electrical pulse disintegration of materials]. Apatity, Kol'skij nauchnyj centr RAN, 2002, 321 p. (In Russ.).
27. Barannik B. G., Konovalova O. E., Minin V. A. *Perspektivy sovershenstvovaniya jenergeticheskogo hozjajstva v rajonah Severa za schet ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenergii* [Prospects for improving the energy sector in the regions of the North through the use of renewable energy sources]. Apatity, Pbl. Kol'skogo nauchnogo centra RAN, 2011, 154 p. (In Russ.).
28. Danilin A. N., Efimov B. V., Kolobov V. V. *Ogranichenie perenaprjazhenij na podstancijah pri kommutacijah razjediniteljami* [Limitation of overvoltage at substations during switching by disconnectors]. Apatity, Kol'skij nauchnyj centr RAN, 2007, 135 p. (In Russ.).
29. Pat. 2284622 Rossijskaja Federacija [Patent 2284622 Russian Federation], MPK H 02 H 9/04, H 01 C 8/04. *Ustrojstvo zashhity ot perenaprjazhenij* [Surge protection device]. Efimov B. V., Danilin A. N., Kolobov V. V.; zajavitel' i patentoobladatel' Kol'skij nauchnyj centr Rossijskoj akademii nauk (RU) [applicant and patent holder Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences]. No. 2005105918/09; zajavl. 02.03.2005; opubl. 27.09.2006, Bjul. no. 27 [application date 02.03.2005, published 27.09.2006, bulletin number 27], 11 p. (In Russ.).
30. Kolobov V. V., Barannik M. B., Zhamaletdinov A. A. *Generatorno-izmeritel'nyj kompleks "Jenergija" dlja jelektromagnitnogo zondirovanija litosfery i monitoringa sejsmoaktivnyh* [Generator-measuring complex "Energia" for electromagnetic sounding of the lithosphere and monitoring of seismically active zones]. Saint Petersburg, SOLO, 2013, 240 p. (In Russ.).
31. Pat. 193419 Rossijskaja Federacija [Patent 193419 Russian Federation], MPK G 01 R 27/20, G 01 N 33/24. *Ustrojstvo dlja izmerenija jelektricheskikh parametrov gruntov s uchetom ih chastotnoj zavisimosti* [A device for measuring the electrical parameters of soils, taking into account their frequency dependence]. Kuklin D. V.; zajavitel' i patentoobladatel' Kol'skij nauchnyj centr Rossijskoj akademii nauk (RU) [applicant and patent holder Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences]. No. 2019116332; zajavl. 27.05.2019; opubl. 29.10.2019, Bjul. № 31 [application date 27.05.2019, published 29.10.2019, bulletin number 31], 13 p. (In Russ.).
32. Pat. 2726043 Rossijskaja Federacija [Patent 2726043 Russian Federation], MPK G 01 R 27/00. *Sposob opredelenija znachenija stacionarnogo soprotivlenija zazemljajushhego ustrojstva opor vozdušnyh linij jelektoperedachi bez otsoedinenija grozozashhitnogo trosa i ustrojstvo dlja ego realizacii* [A method for determining the value of the stationary resistance of the grounding device of overhead transmission line supports without disconnecting the lightning protection cable and a device for its implementation]. Kolobov V. V., Selivanov V. N., Barannik M. B.; zajavitel' i patentoobladatel' Kol'skij nauchnyj centr Rossijskoj akademii nauk (RU) [applicant and patent holder Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences]. No. 2019143484; zajavl. 09.12.2019; opubl. 08.07.2020, Bjul. № 19 [application date 09.12.2019, published 08.07.2020, bulletin number 19], 25 p. (In Russ.).
33. Kuznecov N. M. *Upravlenie jenergojeffektivnost'ju v regionah Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii* [Energy efficiency management in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation]. Apatity, Kol'skij nauchnyj centr Rossijskoj akademii nauk, 2020, 92 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. М. Кузнецов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии;

В. Н. Селиванов — кандидат технических наук, директор.

Information about the authors

N. M. Kuznetsov — PhD (Engineering), Leading Researcher, Laboratory of Power Saving and Renewable Energy Sources;

V. N. Selivanov — PhD (Engineering), Director.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 08.10.2022.
The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 08.10.2022.

Научная статья
УДК 621.548 (470.21)
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.002

ПОТЕНЦИАЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Валерий Андреевич Минин

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия, v.minin@ksc.ru*

Аннотация

Проанализированы нетрадиционные возобновляемые источники энергии Мурманской области. Оценены их ресурсы и возможности практического использования. Особо выделена перспективность вовлечения в хозяйственный оборот ветроэнергетических ресурсов региона. Представлены основные элементы ветроэнергетического кадастра Кольского полуострова, оценены технические ресурсы ветра. Рассмотрены перспективы применения ветроэнергетических установок в электро- и теплоснабжении небольших автономных потребителей, а также крупномасштабного использования ветропарков в составе Кольской электроэнергетической системы.

Ключевые слова:

Мурманская область, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), потенциал и ресурсы ВИЭ, приоритеты использования

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Минин В. А. Потенциал и перспективы использования возобновляемых источников энергии Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 21–31. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.002

Original article

POTENTIAL AND PROSPECTS FOR THE USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES OF THE MURMANSK REGION

Valerii A. Minin

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, v.minin@ksc.ru*

Abstract

Unconventional renewable energy sources of the Murmansk region are considered. Their potential and practical use possibilities are assessed. The prospects of involving the wind energy resources of the region in the economic turnover are highlighted. The main elements of the wind energy cadastre of the Kola Peninsula are presented, the technical resources of wind are estimated. The prospects of using wind power plants in the electricity and heat supply of small autonomous consumers, as well as the large scale use of wind farms as part of the Kola electric power system are considered.

Keywords:

Murmansk region, renewable energy sources (RES), RES potential and resources, use priorities

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Minin V. A. Potential and prospects for the use of renewable energy sources of the Murmansk region // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 21–31. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.002

В последние годы во всем мире ведутся исследования, направленные на поиск и вовлечение в топливно-энергетический баланс новых источников энергии. Особый интерес проявляется к нетрадиционным ВИЭ, таким как энергия солнца, ветра, гидроэнергия малых рек, приливная энергия и др. В России также не сбрасываются со счетов возможности использования ВИЭ [1, 2]. Вовлечение

их в хозяйственный оборот наиболее перспективно в районах, располагающих повышенным потенциалом этих источников и испытывающих недостаток в традиционных топливных ресурсах. На Европейском Севере России к числу таковых относится Мурманская область, энергетика которой в значительной мере базируется на привозном топливе (ядерном горючем, угле, нефтепродуктах, сжиженном газе). Область располагает широким набором возобновляемых источников, способных пополнить ее топливно-энергетический баланс.

Потенциал возобновляемых источников энергии региона

Энергия солнца. Результаты наблюдений на актинометрических станциях Кольского полуострова [3], свидетельствуют, что возможный годовой приход суммарной солнечной радиации составляет 650–850 кВт · ч / м². По этому показателю Мурманская область уступает районам средней полосы и юга страны соответственно в 1,3 и 1,7 раза.

Максимум поступления солнечной энергии отмечается в летний период, когда наступают белые ночи и полярный день. Но нужно иметь в виду, что в условиях Заполярья имеется ряд трудностей, ограничивающих освоение этого источника энергии. В первую очередь, это минимум поступления солнечной энергии или ее полное отсутствие в зимние месяцы, когда потребность в энергии со стороны потребителей максимальна. Во-вторых, в северных широтах из-за активной циклонической деятельности число дней с ясной солнечной погодой сравнительно невелико. Поэтому применение солнечных энергоустановок на Кольском полуострове может найти ограниченное применение, главным образом для небольших удаленных потребителей энергии, испытывающих трудности с поставками жидкого топлива для работы традиционных энергетических установок.

Гидроэнергия малых рек. Потенциальные ресурсы малых рек Мурманской области оцениваются в 6,9 млрд кВт · ч [4]. Технические гидроэнергоресурсы малых рек составляют 4,4 млрд кВт · ч при возможной суммарной среднегодовой мощности малых ГЭС 516 МВт.

Проблема использования гидроэнергии малых рек не нова. В послевоенные годы в Мурманской области было построено несколько сельских малых ГЭС мощностью от 10 до 100 кВт, работавших на напорах от 2 до 6 м. В 1960-е гг. они были вытеснены более дешевыми по тем временам дизельными установками. В настоящее время из-за роста цен на органическое топливо интерес к использованию энергии малых рек существенно возрос.

В регионе имеется большое количество створов, пригодных для сооружения малых и микроГЭС. Но далеко не все из них располагаются вблизи потенциальных потребителей, поэтому значительная часть створов остается невостребованной. В настоящее время в Мурманской области найдется не более десятка населенных пунктов, расположенных вблизи устья рек, впадающих в Белое и Баренцево моря, где возможно сооружение малых ГЭС.

Энергия морских приливов. Кольский полуостров обладает значительными ресурсами приливной энергии. О возможностях их использования свидетельствует пятидесятилетний опыт эксплуатации Кислогубской приливной электростанции (ПЭС). В прибрежных районах Мурманской области имеется несколько площадок, где возможно сооружение ПЭС. В первую очередь, это створ в губе Долгой (западнее Териберки) для строительства Кольской ПЭС мощностью 12 МВт, а также створ в Лумбовском заливе Баренцева моря для возведения Лумбовской ПЭС мощностью до 670 МВт. В настоящее время, ввиду удаленности этих ПЭС, больших удельных капиталовложений и ряда других факторов, вопрос об их сооружении отодвинут на дальнюю перспективу.

Энергия морских волн. Морские волны накапливают в себе энергию ветра на значительном пространстве и тем самым являются природным концентратом энергии. Мощность, переносимая морскими волнами, пропорциональна периоду волны и квадрату ее амплитуды (высоты) [5]. Наибольший интерес представляют волны с большим периодом колебания (свыше 10 с) и амплитудой более 2 м. Недостатком волновой энергии является ее нестабильность во времени, зависимость от ледовой обстановки, сложность преобразования и передачи потребителю в суровых климатических условиях. Поэтому использование этого вида энергии вблизи побережья Кольского полуострова может рассматриваться лишь как дальняя перспектива.

Энергия ветра. Мурманская область располагает высоким потенциалом ветровой энергии, сосредоточенным, главным образом, в прибрежных районах Кольского полуострова [6]. Технические ветроэнергоресурсы региона оцениваются в 360 млрд кВт · ч при суммарной установленной мощности ветроэнергетических установок (ВЭУ) около 120 млн кВт. Это примерно в двадцать раз больше того, чем располагает в настоящее время Кольская электроэнергетическая система. Наиболее сильные и устойчивые ветры наблюдаются на северном побережье Кольского полуострова. Использование здесь хотя бы 1–2 % ресурсов ветра, самых доступных и выгодных (а это 3–7 млрд кВт · ч выработки в год и около 1–2 млн кВт мощности), может иметь большое значение.

В целом из всех рассмотренных нетрадиционных ВИЭ наибольший интерес на Кольском полуострове представляет ветровая энергия. Ветер распространен на обширных территориях и сам «транспортируется» к потребителю. Благоприятными предпосылками для использования ветровой энергии являются: 1) высокий потенциал ветра; 2) совпадение зимнего максимума интенсивности ветра с максимумом потребности в электрической и тепловой энергии со стороны потребителей; 3) взаимодополняющий характер сезонного поступления ветровой энергии и гидроэнергии рек; 4) наличие в Кольской энергосистеме 17 гидроэлектростанций суммарной мощностью более 1,5 млн кВт, позволяющих компенсировать неравномерность поступления энергии ветра и открывающих возможности для крупномасштабного (промышленного) освоения ветроэнергетических ресурсов.

Ветроэнергетический кадастр Кольского полуострова

Ветроэнергетический кадастр представляет собой совокупность характеристик ветра, позволяющих выявить его энергетическую ценность и определить возможные режимы работы ВЭУ.

К числу основных кадастровых характеристик ветра относятся [6]: среднегодовая скорость; годовой ход; повторяемость скоростей и направлений; максимальные скорости; удельная мощность и удельная энергия ветра; ветроэнергетические ресурсы района.

Основным источником исходных данных для разработки ветроэнергетического кадастра являются наблюдения за скоростью ветра на опорной сети гидрометеослужбы. Эти наблюдения, проводимые несколько раз в сутки, охватывают периоды в десятки лет и представляют собой обширнейший фактический материал. Их достоинством является то, что они проводятся по единой методике, а площадки производства наблюдений классифицированы по степени их открытости на местности.

Среднегодовые скорости ветра. Результаты обработки двадцатилетних рядов наблюдений за скоростью ветра по 37 метеорологическим станциям Кольского полуострова, полученные с учетом приведения их к сравнимым условиям, представлены на рис. 1.

По полученным среднегодовым скоростям ветра можно в первом приближении судить о перспективности применения ВЭУ. Только необходимо иметь в виду, что средние скорости зависят от рельефа местности, шероховатости поверхности, наличия затеняющих элементов, высоты над поверхностью земли. Поэтому для сопоставимости средних скоростей ветра их необходимо приводить к сравнимым условиям. За таковые можно, например, принять условия открытой, ровной местности и высоту 10 м от поверхности земли. Именно после такого приведения и представлены значения скоростей на рис. 1.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что наибольшие скорости ветра наблюдаются в прибрежных районах Баренцева моря. На северном побережье Кольского полуострова они составляют 7–9 м / с, на южном — 4–6 м / с. Характерно, что потенциал ветра заметно снижается по мере удаления от береговой линии.

Годовой ход ветра. Он представляет собой (рис. 2) сезонное изменение среднемесячных скоростей ветра.

Наиболее ярко годовой ход ветра проявляется на северном побережье Кольского полуострова. Разница между зимним и летним минимумами среднемесячных скоростей ветра достигает 5–6 м / с, на южном побережье разница меньше — около 3 м / с. Повсеместно максимум скоростей ветра приходится на холодное время года и совпадает с сезонным пиком потребления тепловой и электрической энергии. Весьма существенно, что зимний максимум находится в противофазе с годовым стоком рек (кривая 5 на рис. 2), то есть ветровая и гидроэнергия удачно дополняют друг друга. Это создает благоприятные условия для их совместного использования.

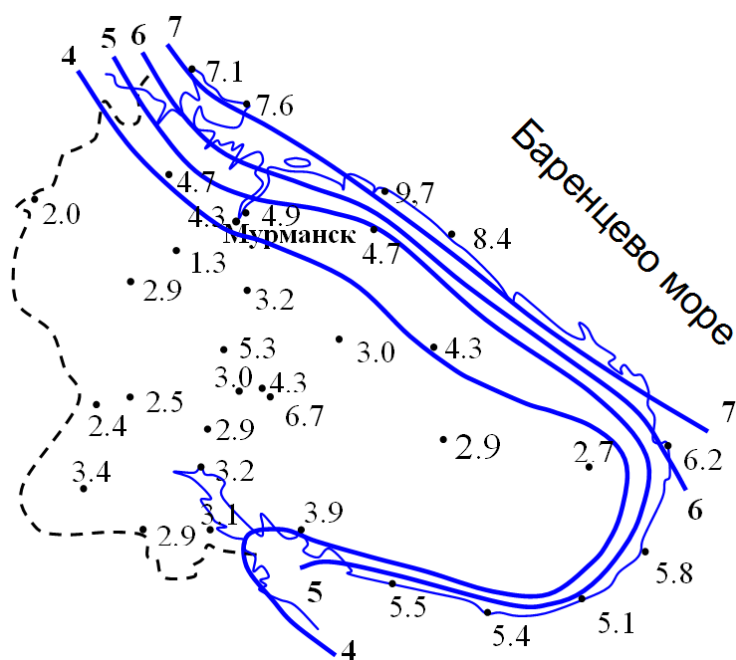


Рис. 1. Средние многолетние скорости ветра (м/с) на высоте 10 м от поверхности земли в условиях открытой, ровной местности

Fig. 1. Average perennial wind speeds (m/s) at a height of 10 m from the surface of the earth in conditions of open, flat terrain

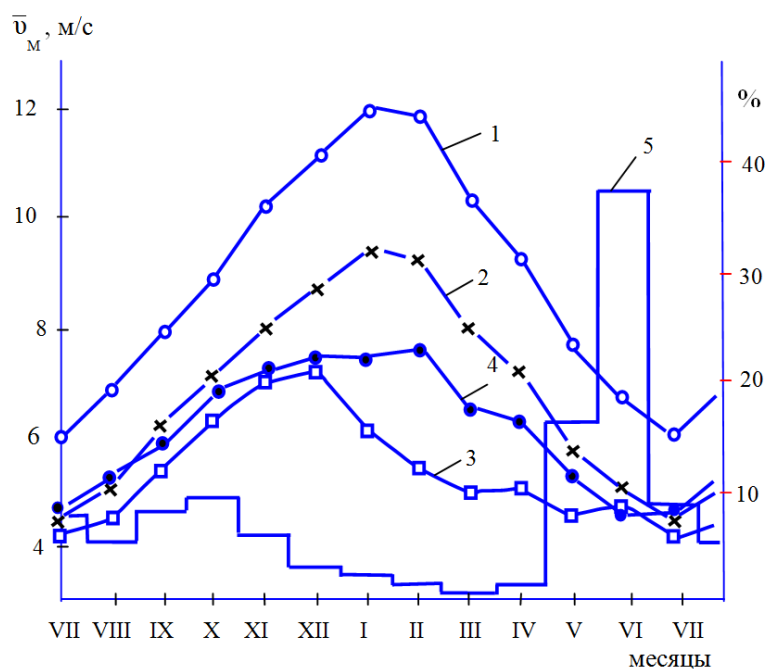


Рис. 2. Годовой ход среднемесячных скоростей ветра на островах (1) и побережье (2) Баренцева моря, на побережье Белого моря (3) и в Хибинских горах (4), а также сезонное изменение стока рек региона (5):

1 — метеостанция острова Харлов; 2 — «Дальние Зеленцы»; 3 — «Чаван'га»; 4 — «Центральная»

Fig. 2. The annual course of the average monthly wind speeds on the islands (1) and the coast (2) of the Barents Sea, on the coast of the White Sea (3) and in the Khibiny Mountains (4), as well as seasonal changes in the flow of rivers in the region (5):

1 — weather station of Kharlov Island; 2 — Dal'niye Zelentsy; 3 — Chavan'ga; 4 — Centralnaja

Повторяемость скоростей ветра показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода, например года, дули ветры с той или иной скоростью. Обычно выполняется аппроксимация (выравнивание) эмпирической повторяемости с помощью различных аналитических зависимостей. Большое распространение получило двухпараметрическое уравнение Вейбулла [2, 7]. На рис. 3 показаны аналитические кривые повторяемости скоростей ветра согласно этому уравнению в условиях Кольского полуострова при различных значениях среднегодовой скорости (от 4 до 12 м / с).

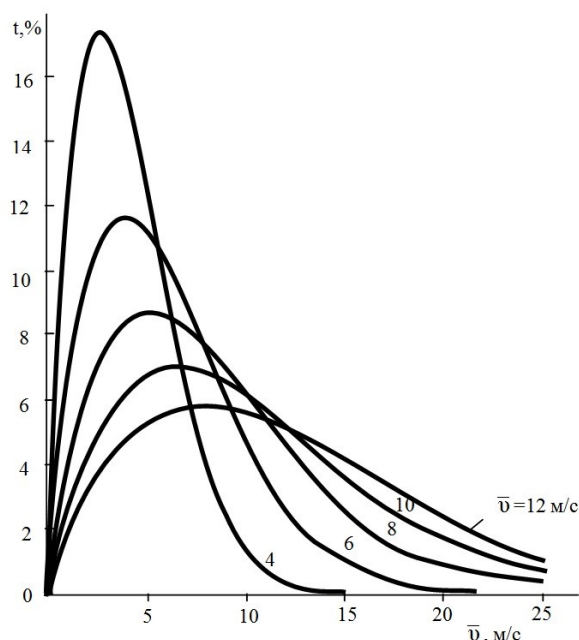


Рис. 3. Кривые повторяемости скоростей ветра при его различных среднегодовых скоростях
Fig. 3. The curves of the repeatability of wind speeds at different average annual wind speeds

Повторяемость направлений ветра показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода (месяца, года) дули ветры того или иного направления. Правильный учет направлений ветра играет важную роль в определении оптимального расположения ветроустановок на местности.

В ходе выполнения исследований было выявлено, что в зависимости от времени года роза ветров и господствующее направление ветра претерпевают существенные изменения. В зимние месяцы (октябрь — март) на ветры юго-западной четверти может приходиться до 70–90 % времени. Преобладание ветров этих направлений является подавляющим. Наличие господствующих направлений ветра позволяет более компактно размещать на местности крупные ветроэнергетические комплексы (ветропарки).

Максимальные скорости ветра. На Кольском полуострове наибольшие скорости ветра наблюдаются на северном побережье Баренцева моря и в Хибинских горах. Здесь один раз в десять лет в трехсекундном порыве максимальные скорости на высоте 10 м могут достигать 45–48 м / с. На высоте 100 м один раз в десять лет может наблюдаться скорость ветра в порыве, равная 49–50 м / с.

Ветроэнергетические ресурсы региона. Обычно рассматривают потенциальные, технические и экономические ресурсы. Под потенциальными ресурсами ветра понимается суммарная энергия движения воздушных масс, перемещающихся за год над данной территорией. Под техническими ресурсами понимается та часть потенциальных, которая может быть использована с помощью имеющихся технических средств. При этом учитываются неизбежные потери. Согласно теории идеального ветроколеса Н. Е. Жуковского в полезную работу может быть преобразована только часть энергии, проходящей через сечение ветроколеса, определяемая максимальным коэффициентом использования энергии ветра $\xi_{\max} = 0,593$. В настоящее время у лучших образцов ветротурбин этот параметр достигает значений 0,45–0,48.

Расчеты технических ветроэнергоресурсов Кольского полуострова были выполнены по зонам, в которых средняя многолетняя скорость ветра на высоте 10 м (рис. 2) составляла: в первой зоне — более 7 м / с, во второй — 6–7 м / с, в третьей — 5–6 м / с, в четвертой — 4–5 м / с. Расчетная скорость ветра (при которой ВЭУ развивает номинальную мощность) повсеместно выбиралась, исходя из обеспечения 3000 часов использования в году установленной мощности ВЭУ. Расчеты показали [6], что если в указанных зонах построить сплошной «лес» ветроустановок, расположенных на расстоянии 10 диаметров ветроколеса друг от друга, то суммарная установленная мощность ВЭУ составит около 120 млн кВт, а годовая выработка электроэнергии (технические ветроэнергоресурсы) — около 360 млрд кВт · ч.

Представленная оценка свидетельствует об огромных ресурсах ветровой энергии на Кольском полуострове, они на порядок превосходят потребности региона на сегодняшний день (12–13 млрд кВт · ч). Постановка задачи об использовании доступной части этих ресурсов и вовлечении их в хозяйственный оборот, безусловно, заслуживает внимания.

Возможные направления использования ветровой энергии

Электроснабжение удаленных децентрализованных потребителей. Основная часть промышленных предприятий, городов и поселков Мурманской области получает электроэнергию от Кольской энергетической системы. Малые удаленные изолированные потребители (отдельные поселки и села, метеостанции, маяки, пограничные заставы, объекты Северного флота и др.) получают электроэнергию от автономных дизельных электростанций (ДЭС). Мощность последних составляет от 8–16 до 300–500 кВт. Общее число таких электростанций исчисляется десятками.

Работа ДЭС связана с потреблением достаточно дорогого дизельного топлива. Из-за удаленности и плохих транспортных связей затраты на топливо возрастают в прибрежных районах Кольского полуострова на 30–70 %, а в труднодоступных районах материковой части — на 150–200 %.

В этих условиях применение ВЭУ может способствовать экономии дорогостоящего топлива. Как показали расчеты, при благоприятных ветровых условиях ВЭУ может вытеснить до 30–50 %, а в наиболее ветреных районах даже до 60–70 % дефицитного органического топлива, что в конечном счете будет способствовать снижению суммарных затрат и себестоимости вырабатываемой электрической энергии.

Участие ВЭУ в теплоснабжении потребителей. Благоприятными предпосылками для такого использования ВЭУ являются следующие факторы: 1) совпадение зимнего максимума потребности в тепловой энергии со стороны потребителя с сезонным максимумом поступления ветровой энергии; 2) применение ВЭУ может превратить ветер из климатического фактора, определяющего рост теплопотерь (рис. 4), в полноценный источник энергии, обеспечивающий именно в ветреные периоды активное поступление энергии на нужды отопления; 3) при вовлечении энергии ветра на нужды отопления не обязательны высокие требования (по частоте, напряжению) к энергии, вырабатываемой ВЭУ; 4) при использовании ВЭУ для теплоснабжения не критичным становится непостоянство ветра во времени.

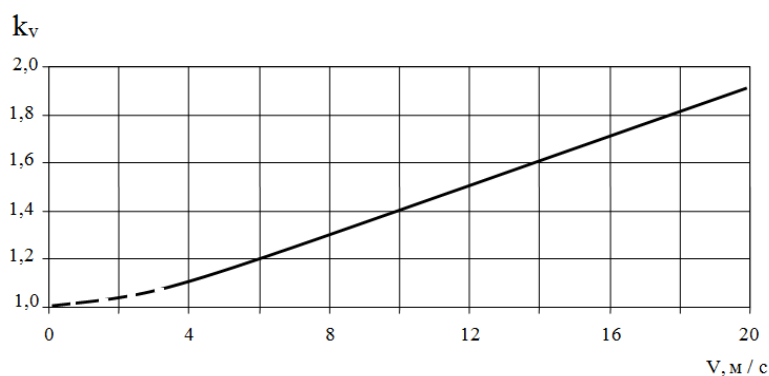


Рис.4. Относительное увеличение теплопотерь здания от скорости ветра
Fig. 4. The relative increase in the heat loss of the building from the wind speed

Кратковременные изменения мощности ВЭУ могут сглаживаться за счет аккумулирующей способности теплоносителя и системы теплоснабжения, а более продолжительные — за счет аккумулирующей способности отапливаемых зданий, а также за счет применения тепловых аккумуляторов или дублирующих источников тепла на органическом топливе.

С учетом ветра потребность здания в тепловой энергии определяется выражением:

$$Q = qBk_v(t_B - t_H), \quad (1)$$

где q — удельная тепловая характеристика здания, кВт / м³ · град; B — наружный объем отапливаемого здания, м³; k_v — коэффициент, учитывающий рост теплопотерь от ветра (рис. 4); t_B и t_H — внутренняя и наружная температура воздуха, °С.

Наружный объем и тепловая характеристика здания являются величинами постоянными, поэтому потребление тепла зависит главным образом от перепада внутренней и наружной температур $\Delta t = t_B - t_H$ и от поправки на ветер, учитываемой коэффициентом k_v .

Если наряду с котельной для отопления использовать ветроустановку соизмеримой мощности, то часть графика отопительной нагрузки будет покрываться от ВЭУ, а остальная — от котельной. В периоды с сильным ветром ВЭУ может в значительной мере или полностью обеспечить потребности в тепле, а иногда даже создать избыток энергии. Зато в периоды холодной маловетреной погоды почти вся нагрузка ложится на котельную.

Все сказанное можно проследить по рис. 5, на котором представлен фрагмент хронологического хода возможного участия ВЭУ в покрытии графика отопительной нагрузки. Кривая 2 с черными точками представляет собой график потребности в тепловой энергии при отсутствии ветра для поддержания температуры внутри помещения $t_B = +20$ °С. Если учесть влияние ветра, то реальный график теплопотребления будет выше, на рис. 5 он обозначен жирной ступенчатой линией 1. На деле редко предложение со стороны ВЭУ (зона 3) будет точно совпадать с потребностью со стороны потребителя. Чаще будет так, что либо выработка ВЭУ будет превышать потребности и создавать избытки энергии (зона 5), либо ее будет не хватать для полного покрытия потребностей и придется часть графика нагрузки (зона 4) покрывать за счет другого источника, например котельной.

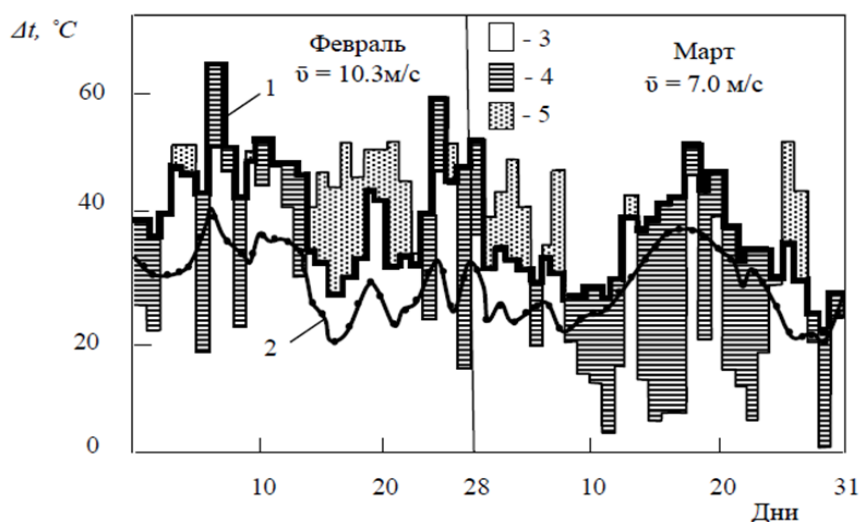


Рис. 5. График отопительной нагрузки здания на полигоне Кольского научного центра Российской академии наук на побережье Баренцева моря:

1 — график нагрузки с учетом ветра; 2 — график нагрузки без учета ветра; 3 — энергия, вырабатываемая ВЭУ; 4 — энергия, вырабатываемая котельной; 5 — избыточная энергия ВЭУ

Fig. 5. Diagram of the heating load of a building at the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences test site on the Barents Sea coast:

1 — load schedule taking into account the wind; 2 — load schedule without taking into account the wind; 3 — the energy generated by the wind turbine; 4 — the energy generated by the boiler house; 5 — the excess energy of the wind turbine

Доля α^T участия ветроустановки в теплоснабжении потребителя определится как отношение полезно использованной выработки ВЭУ, вписавшейся в график отопительной нагрузки, ко всему объему теплопотребления. Синхронная обработка двухлетних данных о температуре наружного воздуха (а значит, о потребности в тепле) и о ветре (предложение со стороны ВЭУ) показали, что доля α^T зависит от мощности ветроустановки $N_{ВЭУ}$, ветровых условий (среднегодовой скорости ветра \bar{V}_2), технической характеристики ВЭУ (расчетной скорости V_p , при которой ВЭУ развивает номинальную мощность $N_{ВЭУ}$), соотношения мощностей ВЭУ и котельной ($\beta^T = N_{ВЭУ} / N_k$).

Аналитически зависимость α^T от указанных факторов аппроксимируется выражением:

$$\alpha^T = 1 - \frac{1}{\exp \left[3,2 \left(\frac{\bar{V}_2}{V_p} \right)^2 \beta^T \right]} \quad (2)$$

Графическая иллюстрация зависимости (2) представлена на рис. 6. Из нее следует, что при прочих равных условиях увеличение мощности ВЭУ (параметра β^T) ведет к увеличению α^T , но этот процесс быстро насыщается. Расчеты, выполненные применительно к ветровым условиям побережья Баренцева моря, показали, что оптимальной является мощность ВЭУ около 0,6–0,8 от мощности котельной. При этом ВЭУ в состоянии вытеснить 50–70 % органического топлива, расходуемого котельной.

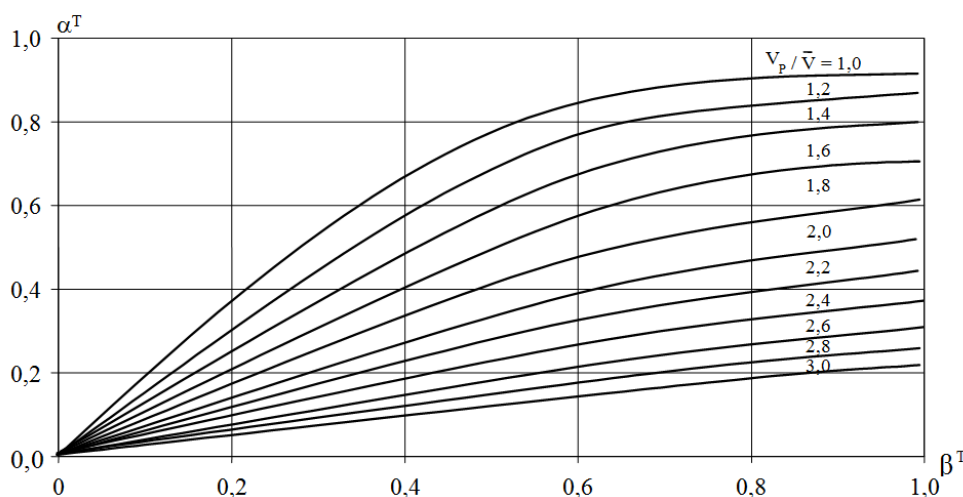


Рис. 6. Зависимость доли участия ВЭУ в покрытии графика тепловой нагрузки от соотношения мощностей $\beta^T = N_{ВЭУ} / N_k$

Fig. 6. Dependence of the share of wind turbines in the coverage of the heat load schedule on the ratio of capacities $\beta^T = N_{ВЭУ} / N_k$

Эффект от использования энергии ветра на нужды отопления может быть повышен за счет применения теплоаккумулирующих устройств, которые позволяют не сбрасывать вхолостую появляющиеся периодически избытки ветровой энергии, а запастись их и в нужное время полезно использовать. В результате участие ВЭУ в покрытии графика отопительной нагрузки увеличивается на 10–25 %. Аккумуляция теплоты позволяет гораздо реже включать в работу котельную. Это способствует упрощению обслуживания системы теплоснабжения и снижению эксплуатационных расходов.

Крупномасштабное использование ВЭУ в составе энергосистемы. Системную ветроэнергетику целесообразно развивать в первую очередь там, где высок потенциал ветра, имеются дороги для доставки ВЭУ, есть выход для выдачи энергии в энергосистему. Предпочтительно, чтобы такой район был вблизи действующих гидроэлектростанций. В Мурманской области этим требованиям отвечает,

например, район, охватывающий Серебрянские и Териберские ГЭС (рис. 7). Это четырехугольник со сторонами примерно 40×40 км, в вершинах которого расположены поселки Териберка и Дальние Зеленцы, Серебрянская ГЭС-1 и развилка автодороги из Мурманска (81-й км) в направлении поселков Териберка и Туманный. Расчеты показывают, что если на 3 % охватываемой площади разместить ВЭУ, то их суммарная мощность может составить около 500 МВт.

На рисунке 7 представлены четыре площадки для сооружения ветропарков. Выдача энергии от ветропарков возможна по существующим линиям электропередачи (ЛЭП) напряжением 150 и 330 кВ. Во избежание перегрузки ЛЭП выдача энергии может осуществляться в компенсационном режиме, то есть со снижением мощности ГЭС при устойчивом сильном ветре. Благодаря этому в водохранилище может накапливаться дополнительный запас воды, линии электропередачи не перегружаются, а система «ветропарки + ГЭС» приобретет более базисные эксплуатационные характеристики. При этом равномерность загрузки ЛЭП возрастет, что приведет к увеличению их экономической эффективности.



Рис. 7. Первоочередные ветропарки вблизи Серебрянских и Териберских ГЭС
Fig. 7. Priority wind farms near the Serebryansky and Teribersky hydroelectric power stations

Представленная на рис. 7 площадка 1 располагается вблизи поселка Лодейное на открытой местности с высотными отметками около 20 м над уровнем моря. Здесь может быть сооружен ветропарк мощностью около 10 МВт. Площадка находится в 8 км от Нижне-Териберской ГЭС мощностью 26 МВт.

Площадка 2 на берегу Верхне-Териберского водохранилища расположена на открытой местности с высотными отметками 150–170 м над уровнем моря, вблизи благоустроенной автомобильной дороги и станционных сооружений Верхне-Териберской ГЭС (130 МВт). Предлагаемая мощность ветропарка 15–20 МВт.

Площадка 3 в районе поселка Туманный находится вблизи Нижне-Серебрянской ГЭС (156 МВт). Здесь на открытой местности может быть сооружен ветропарк мощностью 50 МВт. Близкое расположение к подстанции ГЭС делает удобной выдачу мощности ветропарка в энергосистему.

Площадка 4 — в районе 81-го км автодороги Мурманск — Териберка. Она удалена от Баренцева моря на 30 км, имеет высотные отметки 200–240 м над уровнем моря. Мощность ветропарка может составить около 200 МВт. Энергия может выдаваться на подстанцию Верхне-Серебрянской ГЭС (205 МВт).

К последней площадке проявила интерес компания ПАО «Энел Россия», которая в 2017 г. выиграла тендер на сооружение здесь Кольской ВЭС мощностью 201 МВт. Объем инвестиций, необходимых для реализации проекта, составит около 270 млн евро. Выработка электроэнергии ветропарка — 750 млн кВт · ч в год, срок окупаемости — около 10–14 лет. Правительство Мурманской области и ПАО «Энел Россия» в конце 2018 г. заключили соглашение о сотрудничестве в реализации этого инвестиционного проекта. В настоящее время ветропарк находится в стадии строительства.

Заключение

Развитие энергетики Мурманской области долгие годы происходило за счет последовательного освоения гидроэнергетических ресурсов, использования привозного топлива на ТЭЦ и котельных, а также ядерного горючего на Кольской атомной электростанции. Дальнейшее функционирование энергетики региона определяется состоявшимся продлением сроков эксплуатации блоков Кольской атомной электростанции (до шестидесяти лет), продолжением эксплуатации действующих 17 гидроэлектростанций и двух ТЭЦ. Вместе с тем область располагает широким набором нетрадиционных ВИЭ (энергией солнца, ветра, малых рек, морских приливов, волн и др.), которые в определенных условиях могут существенно дополнить традиционные источники энергии и принести весомый энергетический эффект.

Исследования показали, что использование солнечной энергии в заполярных широтах затруднено из-за низкого уровня поступления солнечной энергии, особенно в зимние месяцы. В области имеется опыт эксплуатации Кислогубской ПЭС и разработаны проекты сооружения Северной ПЭС (12 МВт) и Лумбовской ПЭС (от 320 до 670 МВт). Но пока реализация этих объектов отодвинута на дальнюю перспективу.

Более перспективным для Мурманской области является освоение гидроэнергии малых рек. В настоящее время из-за роста цен на топливо интерес к этому энергоресурсу существенно возрос, особенно со стороны прибрежных потребителей, расположенных недалеко от перспективных створов.

В целом из всех имеющихся в регионе ВИЭ наибольшие перспективы для практического использования имеет ветровая энергия. Технические ветроэнергоресурсы региона оцениваются в 360 млрд кВт·ч при суммарной установленной мощности ВЭУ около 120 млн кВт. Наиболее сильные и устойчивые ветры наблюдаются в прибрежных районах. Здесь среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м составляют 5–8 м/с, число часов использования в году установленной мощности ВЭУ достигает 3000 часов и более.

В числе основных направлений использования ветровой энергии на Кольском полуострове можно назвать применение ВЭУ для энергоснабжения удаленных изолированных потребителей, участие ВЭУ в теплоснабжении потребителей, крупномасштабное применение ВЭУ (ветровых парков) в составе энергосистемы.

Последнее направление открывает возможности для вписывания огромных ресурсов ветра в топливно-энергетический баланс региона. Предложены первоочередные площадки для сооружения ветропарков недалеко от действующих гидроэлектростанций. В 2021 г. на одной из них уже завершилось строительство Мурманской ВЭС мощностью 201 МВт.

Список источников

1. Фортов В. Е., Попель О. С. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. 168 с.
2. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких, Г. А. Борисов, В. И. Виссарионов и др. СПб.: Наука, 2002. 314 с.
3. Справочник по климату СССР. Вып. 2, ч. 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 62 с.
4. Дмитриев Г. С., Минин В. А. Гидроэнергетический потенциал малых рек Мурманской области // Энергия: экономика, техника, экология. 2008. № 8. С. 15–22.
5. Сичкарев В. И., Акуличев В. А. Волновые энергетические станции в океане. М.: Наука, 1989. 132 с.
6. Зубарев В. В., Минин В. А., Степанов И. Р. Использование энергии ветра в районах Севера. Л.: Наука, 1989. 208 с.
7. Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 80 с.

References

1. Fortov V. E., Popel' O. S. *Jenergetika v sovremennom mire* [Energy in the modern world]. Dolgoprudnyj, Izdatel'skij Dom "Intellekt", 2011, 168 p. (In Russ.).
2. Bezrukih P. P., Borisov G. A., Vissarionov V. I., Evdokimov V. M., Malinin N. K., Ogorodov N. V., Puzakov N. V., Sidorenko G. I., Shpak A. A. *Resursy i jeffektivnost' ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии v Rossii* [Resources and efficiency of renewable energy sources in Russia]. Saint Petersburg, Nauka, 2002, 314 p. (In Russ.).
3. *Spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 2, ch.1. Solnechnaja radiacija, radiacionnyj balans i solnechnoe sijanie* [Handbook of the USSR climate. Issue 2, Part 1. Solar radiation, radiation balance and sunshine]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966, 62 p. (In Russ.).
4. Dmitriev G. S., Minin V. A. *Gidrojenergeticheskij potencial malyh rek Murmanskoy oblasti* [Hydropower potential of small rivers of the Murmansk region]. *Jenerгija: jekonomika, tehnika, jekologija* [Energy: Economics, Technology, Ecology], 2008, no. 8, pp. 15–22. (In Russ.).
5. Sichkarev V. I., Akulichev V. A. *Volnovye jenergeticheskie stancii v okeane* [Wave power stations in the ocean]. Moscow, Nauka, 1989, 132 p. (In Russ.).
6. Zubarev V. V., Minin V. A., Stepanov I. R. *Ispol'zovanie jenerгии vetra v rajonah Severa* [The use of wind energy in the North]. Leningrad, Nauka, 1989, 208 p. (In Russ.).
7. *Rekomendacii po opredeleniju klimaticheskikh harakteristik vetrojenergeticheskikh resursov* [Recommendations for determining the climatic characteristics of wind energy resources]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989, 80 p. (In Russ.).

Информация об авторе

В. А. Минин — кандидат технических наук, заведующий лабораторией.

Information about the author

V. A. Minin — PhD (Engineering), Head of Laboratory.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 08.10.2022.
The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 08.10.2022.

Научная статья
УДК 620.9
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.003

КАК РАЗРАБАТЫВАЛСЯ МЕХАНИЗМ ИНВЕСТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА КОЛЬСКОЙ АЭС-2: ИСТОРИЯ ПРАКТИКИ И ТЕОРИИ

Вероника Валерьевна Победоносцева

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия, v.pobedonosceva@ksc.ru*

Аннотация

Статья посвящена истории разработки финансово-экономического механизма инвестирования в строительство Кольской АЭС-2 и другие инвестиционные энергетические проекты Мурманской области в 1990–2000-е гг. в Институте физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (ИФТПЭС КНЦ РАН) под руководством директора (1993–2000 гг.) и заведующего одной из лабораторий (1947–2019 гг.) доктора технических наук В. Р. Елохина.

Ключевые слова:

Мурманская область, Кольская АЭС-2, открытое акционерное общество, Инвестиционный энергетический фонд, «Инвестиционная энергетическая компания», финансово-экономический механизм инвестирования, государственно-частное партнёрство, методические подходы

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Победоносцева В. В. Как разрабатывался механизм инвестирования строительства Кольской атомной электростанции — 2: история практики и теории // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 32–42. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.003

Original article

HOW THE MECHANISM OF INVESTING THE CONSTRUCTION OF THE KOLA NUCLEAR POWER PLANT — 2 WAS ELABORATED: HISTORY OF PRACTICE AND THEORY

Veronika V. Pobedonostseva

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, v.pobedonosceva@ksc.ru*

Abstract

The article is devoted to the history of the elaboration of a financial and economic mechanism for investing in the construction of the Kola NPP-2 and other investment energy projects of the Murmansk region in the 1990s — 2000s at Northern Energetics Research Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences under the leadership of the director (1993–2000) and the head of one of the laboratories (1947–2019) V. R. Elokhin, Doctor of Sciences (Engineering).

Keywords:

Murmansk region, Kola NPP-2, open joint stock company, Investment Power Fund, Investment Power Company, financial and economic investment mechanism, public-private partnership, methodological approaches

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Pobedonostseva V. V. How the mechanism of investing the construction of the Kola Nuclear Power Plant — 2 was elaborated: history of practice and theory // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 32–42. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.003

Памяти Владислава Романовича Елохина

Введение

1990-е гг. были трудными и тревожными для нашей страны. Политико-экономические и правовые реформы породили глубокие инвестиционный и энергетический кризисы в отраслях народного хозяйства всех её регионов, в том числе Мурманской области.

Практика

В 1994 г. сотрудниками ИФТПЭС КНЦ РАН был проведён анализ специфики энергетического кризиса в Мурманской области и определены пути его преодоления, основными из которых были названы «сохранение достигнутого уровня развития, строительство Кольской АЭС-2 (КАЭС-2), газификация области и энергосбережение» [1]. В сложившихся условиях приоритетным решением проблем надёжного энергоснабжения не только Мурманской области, но и Баренц-региона в целом было признано строительство КАЭС-2 [2].

Инвестиционный кризис побудил ИФТПЭС, энергетиков региона, многих других заинтересованных лиц (организации и учреждения государственного и частного уровней) инициировать и продвигать поиск финансовых, инвестиционных средств для реализации сооружения КАЭС-2 и других актуальных для области инвестиционных энергетических проектов (ИЭП). Наличие инвестиционных средств в те годы определялось не только финансовой коммерческой привлекательностью проектов, но и условиями рынка энергоносителей, нормативно-законодательной средой. Федеральных средств, поступавших для реализации проекта и строительства Кольской АЭС-2, было недостаточно, хотя необходимые решения были приняты. За счёт внутренних финансовых возможностей Мурманская область не могла обеспечить строительство столь крупного и дорогостоящего объекта, как атомная электростанция. Важным источником финансирования проекта представлялось участие зарубежных партнёров с возвратом вложенных средств путём передачи (продажи по специальному тарифу) в соседние страны части электроэнергии, которую вырабатывала действующая АЭС и стала бы вырабатывать КАЭС-2.

В это время в ИФТПЭС в результате выполняемых исследований зародилась идея создания специализированной акционерной компании для ускорения реализации проекта КАЭС-2 при общей, тем не менее, ориентации на финансирование его из федерального бюджета. Акционерами такой компании стали администрация Мурманской области, концерн «Росэнергоатом», РАО «ЕЭС России», предприятия (фирмы) — поставщики необходимого по проекту оборудования, предприятия (фирмы) — существующие и потенциальные потребители электроэнергии.

Идея такой компании родилась из тех соображений, что экономические субъекты, решившие реализовать капиталоемкий инвестиционный проект, только в исключительных случаях способны обойтись собственными средствами и потому вынуждены обращаться к финансовому или инвестиционному институту, который должен играть роль посредника между экономическим субъектом и его инвесторами в том случае, если не все инвесторы имеют достаточную квалификацию для эффективного выбора объектов инвестирования и последующего управления ими [3], что было особенно актуально в России в 1990-е гг. Авторам [1] представлялось, «что в условиях акционирования ПОЭиЭ совместно со средствами льготных государственных кредитов основным источником средств будут являться амортизационные отчисления в инвестиционный фонд и нераспределённая между акционерами прибыль АО» [1] (ПОЭиЭ — производственное объединение энергетики и электрификации), а использование других источников — коммерческих (банковских) кредитов, долгосрочных облигаций и т. д. — было «проблематично по общим причинам экономического кризиса» [1], то есть появилось упоминание о конкретном виде и организационно-правовой форме специализированной акционерной компании — акционерном инвестиционном фонде.

В 1994 г. в ИФТПЭС под руководством тогда директора, заведующего лабораторией имитационного моделирования социально-экономических проблем развития энергетики доктора технических наук Владислава Романовича Елохина был разработан пакет документов для учреждения Инвестиционного энергетического фонда (акт сдачи-приёмки от КАЭС-2 от 9 декабря 1994 г.). А к 10 января 1995 г. там же

и под руководством В. Р. Елохина был разработан бизнес-план инвестиционного проекта КАЭС-2 [4]. В нём был определён круг потенциальных инвесторов и рассмотрены различные условия взаимодействия с ними, а также выполнена оценка финансово-экономической эффективности КАЭС-2. В бизнес-плане содержится раздел «Проект положения об инвестиционном энергетическом фонде Мурманской области», в котором приведена возможная схема организации деятельности такого фонда (рис. 1).

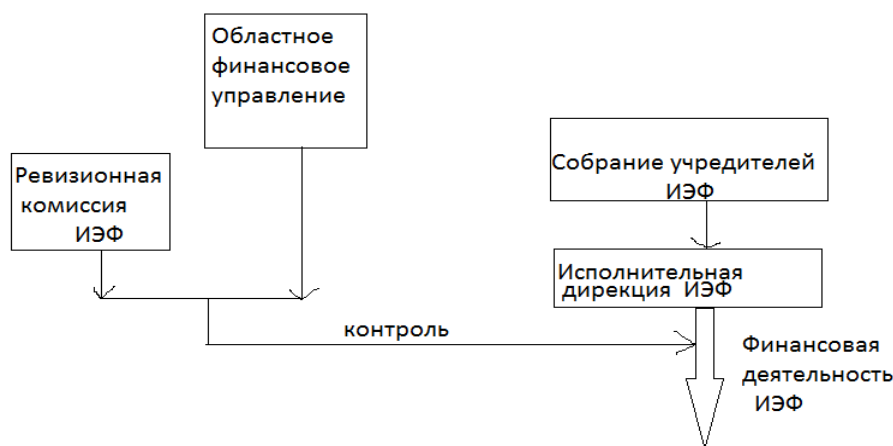


Рис. 1. Предполагаемая схема организации деятельности Инвестиционного энергетического фонда (ИЭФ) [4]
Fig. 1. The proposed scheme of the organization of the activities of the Investment Energy Fund (IEF) [4]

Первоначально всеми заинтересованными юридическими лицами, в том числе на уровне Мурманской областной администрации, было решено создать открытое акционерное общество «Инвестиционный энергетический фонд» (ОАО «ИЭФ»). ИЭФ ориентировали, в первую очередь, «на решение проблемы неплатежей между рядом промышленных предприятий области и АО «Колэнерго» по вексельной схеме [5]. В последующем фонд должен был реализовать схему аккумулирования свободных средств (в том числе населения) посредством выпуска акций и вложения их от своего имени в ценные бумаги инвестируемых объектов. Чистая прибыль фонда после соответствующей капитализации должна была направляться на строительство КАЭС-2.

Однако параллельно в качестве альтернативы ОАО «ИЭФ» рассматривался ещё один вариант инвестиционного института-посредника — инвестиционная компания, которая по многим параметрам имела преимущества.

14 мая 1996 г. в Мурманской областной администрации состоялось совещание «О создании инвестиционных фондов», а по сути — учредительная конференция ИЭФ, на которой присутствовала по приглашению В. Р. Елохина и автор статьи.

На конференции при утверждении и обсуждении размера уставного капитала (УК), распределении вкладов в него учредителей пришлось учесть, что между последними не решена проблема неплатежей, то есть большинство из них — должники друг друга, поэтому они не могли сразу определиться с долями своего участия в УК. Кроме того, в регионе сложилась неблагоприятная финансовая ситуация. Поэтому то обстоятельство, что, в соответствии с действующим в то время российским инвестиционным законодательством [6], срок формирования УК инвестиционного фонда (0,5 года) меньше, чем УК инвестиционной компании (1 год), стало решающим аргументом в пользу учреждения ОАО «Инвестиционная энергетическая компания» (ОАО «ИЭК»). В итоге В. Р. Елохину как её президенту было дано время на доработку документов, ОАО «ИЭК» была учреждена и 31 января 1997 г. зарегистрирована. Развёрнутое обоснование выбора вида и организационно-правовой формы ИЭК содержится в [3].

В состав учредителей ИЭК вошли ОАО «Колэнерго», юридические лица — ряд предприятий и организаций различных форм собственности, в том числе коммерческих, институты и т. д. из Москвы, Санкт-Петербурга, Мурманска, Апатитов, Мончегорска, Оленегорска, Полярных Зорь. Учредителем также стала администрация Мурманской области — представитель государства.

Работа автора в ИФТПЭС началась в августе 1995 г. под непосредственным руководством В. Р. Елохина в его лаборатории.

Вначале было поручено работать с Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов (методикой, пришедшей в постсоветское время на смену методу приведённых затрат) на предмет построения алгоритма её применения. Вскоре Владислав Романович перенаправил автора на разработку финансово-экономического механизма инвестирования (ФЭМИ) в строительство КАЭС-2, реализацию других ИЭП Мурманской области с участием инвестиционного института-посредника и построение алгоритма такой разработки. Этому, кроме того, предшествовали изучение и проработка законодательных и нормативных документов Российской Федерации в области инвестиционной деятельности, акционирования, рынка ценных бумаг, а также учредительных документов ИЭФ, а затем и ИЭК.

В случае участия в ФЭМИ инвестиционного посредника имеет место так называемый механизм непрямого инвестирования, в процессе которого инвесторы приобретают ценные бумаги, выпускаемые компанией-посредником, размещающим собранные таким образом инвестиционные средства по своему усмотрению, выбирая наиболее эффективные объекты для инвестирования в них, участвуя в управлении такими средствами и распределяя полученные доходы среди своих клиентов-инвесторов.

Первоначально разработанная концептуальная схема механизма непрямого инвестирования приведена на рис. 2. Возможная развёрнутая схема конкретного ФЭМИ, механизма непрямого инвестирования с участием ОАО «ИЭК» в качестве инвестиционного посредника, представлена на рис. 3.

То, что специально для реализации конкретного ИЭП была создана специализированная акционерная компания, и то, что в состав его инвесторов вошли одновременно представители государства и частного бизнеса, — всё это делает схему на рис. 3 прототипом механизма государственно-частного партнёрства, столь активно используемого сейчас для реализации арктических, в том числе энергетических, проектов.

Позднее удалось разработать и сформулировать определённые методические подходы к разработке ФЭМИ, построить её алгоритм и модели использования таких подходов. Об этом будет сказано далее.

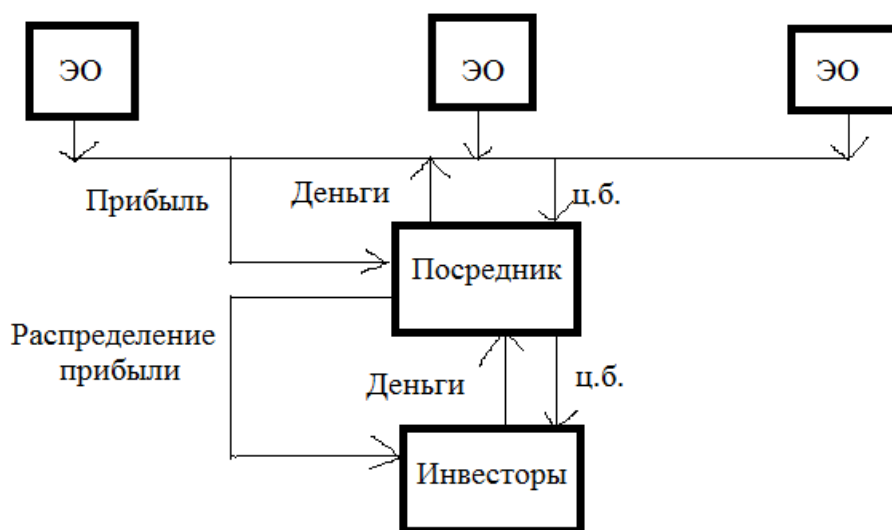


Рис. 2. Концептуальная схема механизма непрямого инвестирования [3]:

ЭО — энергетический объект; ц. б. — ценные бумаги

Fig. 2. Conceptual scheme of indirect investment mechanism [3]:

ЭО — energy facility; ц. б. — securities

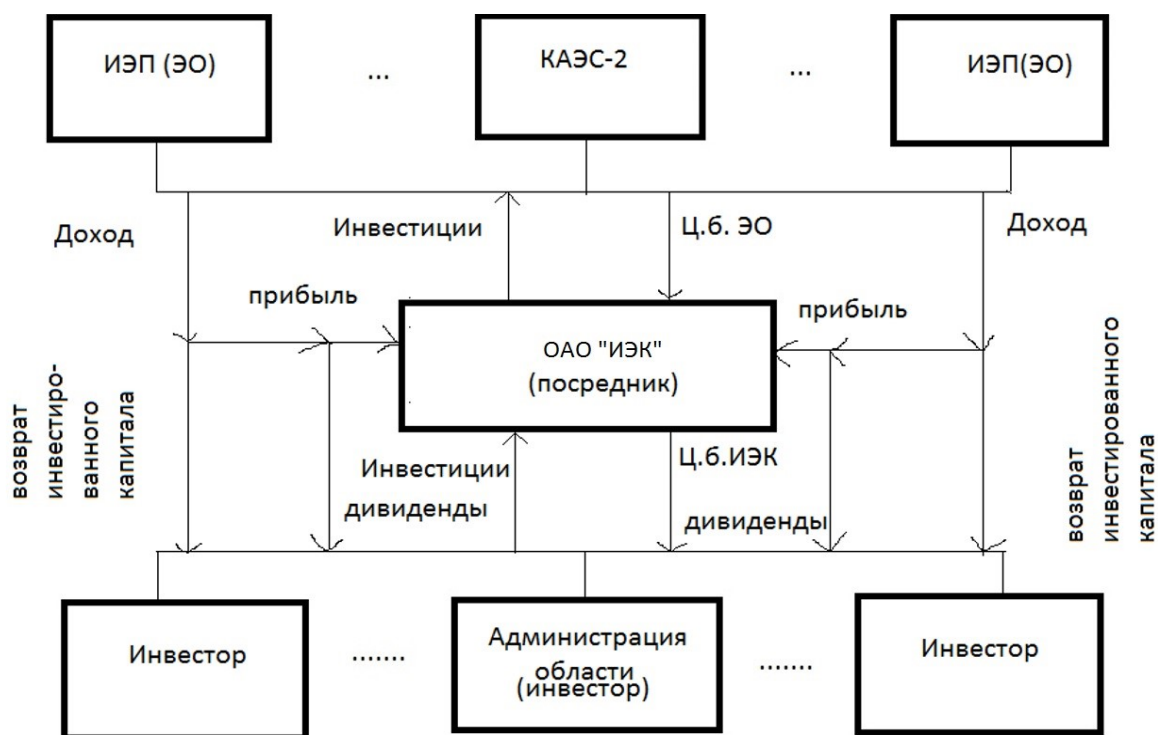


Рис. 3. Схема механизма непрямого инвестирования с участием ОАО «ИЭК»: ИЭП — инвестиционный энергетический проект; ЭО — энергетический объект; Ц. б. — ценные бумаги (например, акции)

Fig. 3. Scheme of indirect investment mechanism with participation of OJSC IEC: ИЭП — investment energy project; ЭО — energy facility; Ц. б. — securities (for example, shares)

Теория

Исторически инвестирование осуществлялось собственными силами (инвестирование без посредников), но по мере развития инвестиционных отношений возник механизм инвестиционного посредничества, то есть передачи части или всех функций сторонней организации или частному лицу [7, с. 50]. Институциональными инвестиционными посредниками являются, в частности, кредитные организации, фондовые биржи, государственные бюджетные и внебюджетные фонды, государственные и муниципальные казенные учреждения.

Изначально инвестиционный процесс был представлен только механизмом инвестирования, которому можно дать также определение как функциональному взаимодействию связанных структурных компонентов, объединенных в самоорганизованную систему и обеспечивающих процесс движения стоимости сбережений через преобразование ее в авансированную стоимость инвестиционных товаров с целью получения прироста накоплений.

Инвестиционная деятельность не ограничивается только распределением капитальных вложений, поскольку в процессе расширенного воспроизводства участвуют не только основные, но и добавочные средства производства, образуются накопления, в ее сферу включаются инновационные тенденции глобального рынка, государственное и корпоративное управление экономикой и т. д. Добавление этих системных регуляторов к структурным компонентам механизма инвестирования формирует систему более высокого уровня — инвестиционный механизм (рис. 4 [8, с. 21]).

Инвестиционный механизм определяется так же, как «совокупность механизмов привлечения и размещения ресурсов, предназначенных для воспроизводства основных фондов экономики страны или региона, а также механизмов управления инвестициями. Элементами инвестиционного механизма являются цель, принципы, методы и технологическая основа реализации инвестиционной деятельности» [7, с. 50].



Рис. 4. Структурные компоненты процесса инвестиционной деятельности
 Fig. 4. Structural components of the investment activity process

В работе [9, с. 13] сущность инвестиционного механизма формулируется как совокупность форм и методов, источников инвестиций, инструментов и рычагов воздействия на воспроизводственный процесс на макро- и микроуровнях в интересах расширения производства. Совокупность всех источников и методов финансирования представляет собой механизм инвестирования или, точнее сказать, финансовый механизм осуществления реальных инвестиций [10, с. 83]. Автор [11, с. 154] приводит возможные виды финансирования региональных инвестиционных проектов: бюджетное, кредитное, смешанное, с участием федерального бюджета, с привлечением инвесторов, с участием инвестиционных фондов.

Делая отступление, отметим, что, например, все методы установления тарифов в теплоснабжении основаны на необходимой валовой выручке. Организация финансирования инвестиционного процесса предполагает не только привлечение финансовых ресурсов, но и механизм возврата инвестору его вложений с обеспечением определенного уровня доходности на инвестированный капитал. Во всех случаях инвестиционные затраты оплачиваются конечными потребителями путем оплаты приобретаемого товара. С точки зрения инвестиционного механизма происходит трансформация авансовой стоимости инвестиционного товара сначала в стоимость продукта производства, а затем в стоимость потребительского товара. Таким образом, категории ценообразования (методы тарифообразования), в данном случае в теплоснабжении, также можно считать механизмами финансирования инвестиционных программ субъектов коммунальной энергетики [12, с. 22].

Представляется, что механизм инвестирования любых проектов энергетики, как и энергосбережения и повышения энергоэффективности, можно рассматривать в качестве самоорганизованной системы, элементами которой являются прямые и (или) косвенные выгодоприобретатели инвестирования в искомый объект, реализация организационно- и (или) финансово-экономических, а также правовых отношений между которыми приводит к функционированию системы и в результате — к инвестированию искомого объекта.

Вообще говоря, в российской экономике существует уже множество известных и опробованных организационно- и финансово-экономических механизмов инвестирования (ОЭМИ, ФЭМИ) не только для применения в энергетической сфере, например государственно-частное партнёрство и энергосервисный контракт (очень распространённые именно в энергетике), прямое инвестирование, концессия, лизинг, селенг, факторинг и др. Ранее [13–15] было показано, что процесс выбора ФЭМИ, ОЭМИ, стратегического инвестора и других участников механизма инвестирования может быть реализован с применением единого алгоритма последовательного принятия инвестиционных решений на прединвестиционной стадии жизненного цикла инвестиционного проекта.

Введём обозначения: ЭО — энергетический объект; ИП — инвестиционный проект; БП — бизнес-план; ФЭМИ, ОЭМИ — финансово- или организационно-экономический механизмы инвестирования, СКФИ — специализированный кредитно-финансовый институт (фонд, компания и др.); УЧ — участник ФЭМИ или ОЭМИ; ОПФ — организационно-правовая форма (акционерное общество (АО), товарищество, общество, их виды). Пусть $k > 1 > m$, $i = \overline{1, k}$; $j = \overline{1, l}$; $v = \overline{1, m}$; $x = \overline{1, n}$; $y = \overline{1, q}$; $z = \overline{1, p}$. Тогда такой алгоритм можно представить графически (рис. 5).

Однако механизм инвестирования может быть также комбинацией каких-либо известных ФЭМИ (ОЭМИ) или заново разработан. Приведённый же алгоритм отражает выбор участников (элементов) для уже готовой (с известными взаимосвязями) модели механизма инвестирования. Такой метод разработки ФЭМИ (ОЭМИ) напоминает известный научный метод теоретического исследования — метод восхождения от абстрактного к конкретному. То есть сначала определяют цель и, соответственно, главную связь (отношение) механизма, потом прослеживают её видоизменение от элемента к элементу, открывают новые связи, устанавливают их взаимодействия, отражающие, в свою очередь, сущность данного механизма инвестирования, и, наконец, подбирают элементы механизма.

Таким образом, представляется, что модели механизмов инвестирования любых проектов энергетики, как и энергосбережения и повышения энергоэффективности, могут разрабатываться двояким — прямым и обратным — методом. Можно сначала выявить потенциальных выгодоприобретателей искомого проекта или процесса, определить элементы (участников инвестирования) и после этого выстраивать между ними взаимосвязи (рис. 6). Можно идти другим путём и разрабатывать модель такого механизма, участие в котором делает его участников выгодоприобретателями (рис. 7). На рис. 7 взаимосвязи построены условно.

Выводы

1. По сути, создание ИЭК на территории Мурманской области было правильным для того периода выбором стратегического направления привлечения инвестиционного ресурса на принципах государственно-частного партнерства. Однако отсутствие законодательной базы на федеральном уровне, кризис 1998 г. и принятие в июле 2001 г. постановления Правительства Российской Федерации [16], которым был дан старт реформе РАО «ЕЭС России» (вместо вертикально интегрированных многопрофильных компаний реформой предполагалось создание структур, специализирующихся на отдельных видах деятельности, что позволяло усилить контроль государства в естественно-монопольных сферах, а конкурентные области сделать частными), обусловили неактуальность деятельности территориальной ИЭК при реализации крупных инвестиционных проектов.

2. В ходе дальнейших исследований необходимо определить возможности симбиоза, взаимной интеграции, встраиваемости инвестиционных механизмов, в результате которых создаются — назовём их гибридными — мотивационные механизмы инвестирования ИЭП, энергосберегающих проектов в электро- и теплоснабжении, а также перспективных проектов повышения энергоэффективности (например, механизм энергосервиса + государственно-частное партнёрство, проектное финансирование в рамках государственно-частного партнерства и т. п.). Необходимо также анализировать мировую практику финансирования и инвестирования таких проектов. Полученные результаты позволят разработать и сформулировать предложения взаимовыгодных форм участия в проектах в рассматриваемых сферах потенциальным инвесторам.

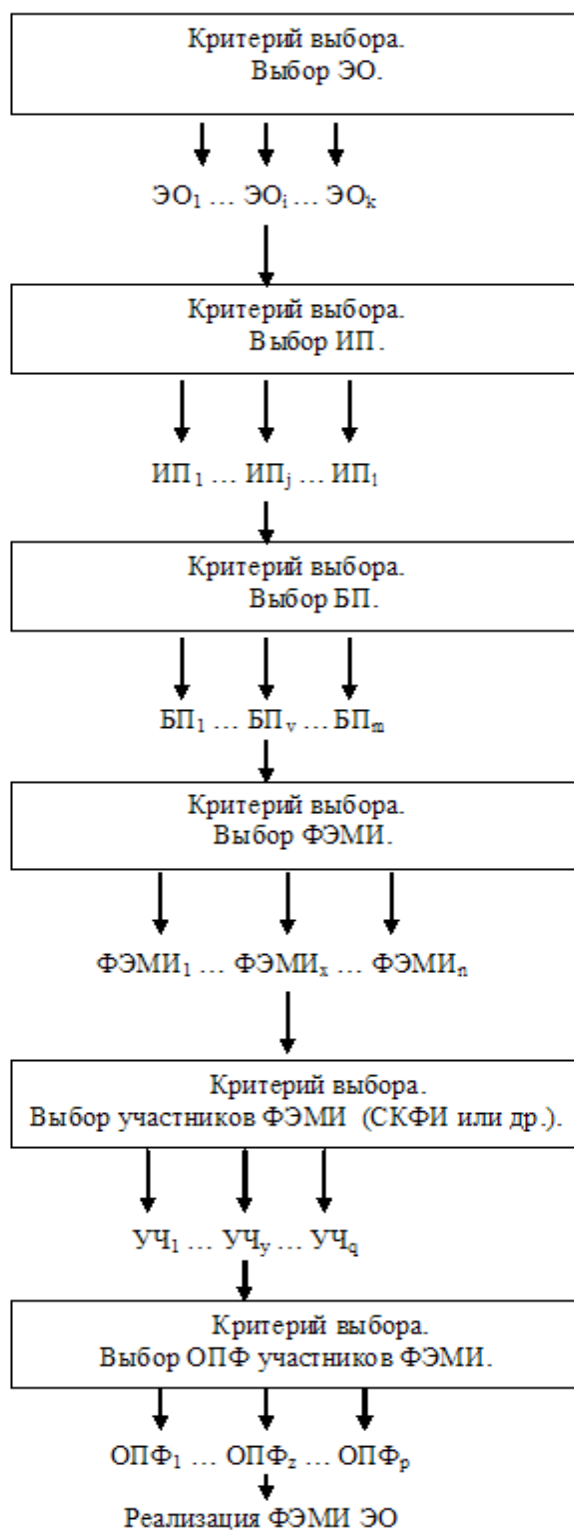


Рис. 5. Блок-схема алгоритма принятия решений на преинвестиционной стадии реализации ИЭП (разработки механизма инвестирования)

Fig. 5. Block diagram of the decision-making algorithm at the pre-investment stage of the implementation of the IEP (development of the investment mechanism)

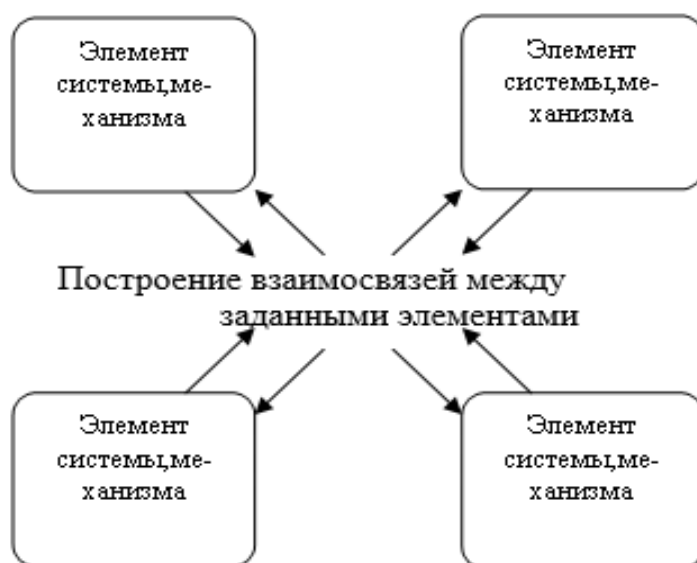


Рис. 6. Первый метод построения модели механизма инвестирования
Fig. 6. The first method of constructing a model of the investment mechanism

Подбор элементов механизма при известных взаимосвязях

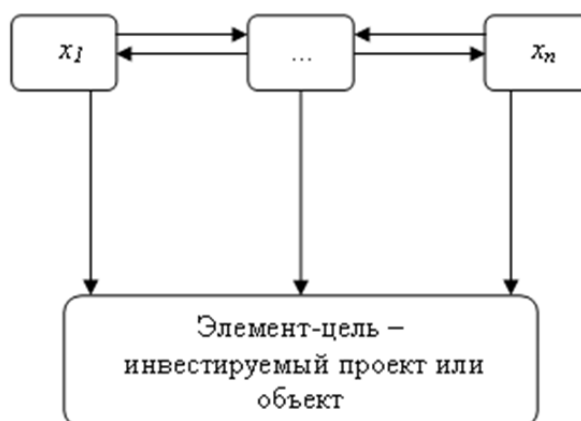


Рис. 7. Второй метод построения модели механизма инвестирования
Fig. 7. The second method of constructing a model of the investment mechanism

Список источников

1. Елохин В. Р., Степанов И. Р. Энергетический кризис в Мурманской области: ход и причины, пути преодоления // Энергетика Мурманской области в переходный период. Апатиты, 1994. С 6–11.
2. Баранник Б. Г., Борисов Г. А., Елохин В. Р., Криворучский Л. Д. Проблемы формирования региональной стратегии развития Баренцрегиона // Научные и методические основы управления развитием энергетики Баренцрегиона / отв. ред. д. т. н. В. Р. Елохин. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. С. 18–36.
3. Елохин В. Р., Победоносцева В. В. Возможности организации инвестирования энергетических объектов. Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН, 2002. 21 с.
4. Отчёт о НИР. Разработка бизнес-плана инвестиционного проекта КАЭС-2. Хоздоговор № 2082/92-1904 / рук. Елохин В. Р.; отв. исп. Криворучский Л. Д. Апатиты, 1994. Акт сдачи-приёмки от института «Атомэнергопроект» от 10.01.1995.

5. Основные направления развития энергетики Баренцрегиона: препринт / Б. Г. Баранник, В. Р. Елохин, Л. Д. Криворуцкий, В. А. Минин, В. И. Рабчук. Апатиты, 1997. 40 с.
6. Постановление Правительства РСФСР от 28 декабря 1991 г. № 78 «Об утверждении Положения о выпуске и обращении ценных бумаг и фондовых биржах в РСФСР» // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_214/ (дата обращения: 12.12.2022).
7. Салимов Л. Н. Инвестиционные механизмы: сущность, компоненты и классификация (окончание) // Вестник ТИСБИ. 2004. Вып. 1. С. 42–53.
8. Победоносцева В. В., Победоносцева Г. М. Механизмы инвестирования в энергетическом комплексе региона Крайнего Севера. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2014. 118 с.
9. Николаев М. А., Малышев Д. П. Методология построения механизма управления инвестиционной деятельностью в регионе // Вестник ПсковГУ. Серия: Экономика. Право. Управление. 2014. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-postroeniya-mehanizma-upravleniya-investitsionnoy-deyatelnostyu-v-regione> (дата обращения: 24.10.2022).
10. Шеховцова Л. В. Научно-практический инструментальный механизм инвестирования обновления основных фондов в строительстве // Transport Business in Russia. 2015. № 1. С. 81–84.
11. Хоменко В. В. Источники финансирования инвестиционных проектов как инструмент развития региона // Проблемы современной экономики. 2019. № 1 (69). С. 153–155.
12. Pobedonosceva V. V., Pobedonosceva G. M. Methods tariff as a mechanism for financing the investment program subjects for municipal energy Russia // Magyar Tudományos Journal. European multi scientific journal (Budapest, Hungary). 2017. № 4. P. 17–23.
13. Победоносцева В. В. Алгоритм принятия решений на прединвестиционной стадии реализации инвестиционных проектов // Материалы IV Всероссийской научно-практической интернет-конференции (Уфа, 15 октября — 15 ноября 2010 г.). Уфа: ИСЭИ УНЦ РАН, 2010. Ч. 1. С. 145–148.
14. Победоносцева В. В. Возможные подходы к организации инвестирования энергетических объектов региона // Российский экономический интернет-журнал — Интернет-журнал АТ и СО / Акад. труда и соц. отношений. 2009. № 3. С. 576–583. URL: <http://www.e-rej.ru/Articles/2009/Pobedonostseva.pdf>.
15. Победоносцева В. В. Механизм инвестирования в региональном энергетическом комплексе: дис. ... канд. экон. наук. Апатиты, 2011. 204 с.
16. Постановление Правительства РФ «О реформировании электроэнергетики Российской Федерации» от 11.07.2001 № 526 (с изменениями на 20 марта 2013 года) // КОНСОРЦИУМ КОДЕКС: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901792626> (дата обращения: 12.12.2022).

References

1. Elohin V. R., Stepanov I. R. Jenergeticheskij krizis v Murmanskoy oblasti: hod i prichiny, puti preodolenija [The energy crisis in the Murmansk region: the course and causes, ways to overcome]. *Jenergetika Murmanskoy oblasti v perehodnyj period* [Energy of the Murmansk region in the transition period]. Apatity, 1994, pp. 6–11. (In Russ.).
2. Barannik B. G., Borisov G. A., Elohin V. R., Krivoruckij L. D. Problemy formirovanija regional'noj strategii razvitija Barencregiona [Problems of forming a regional development strategy for the Barents region]. *Nauchnye i metodicheskie osnovy upravlenija razvitiem jenergetiki Barencregiona* [Scientific and methodological foundations of energy development management in the Barents region]. Apatity, KNC RAN, 1997, pp. 18–36. (In Russ.).
3. Elohin V. R., Pobedonosceva V. V. *Vozможности organizacii investirovanija jenergeticheskikh objektov* [Opportunities for the organization of investment of energy facilities]. Apatity, pbl. Kol'skogo nauchnogo centra RAN, 2002, 21 p. (In Russ.).
4. Otchjot o NIR. *Razrabotka biznes-plana investicionnogo proekta KAJeS-2* [Development of a business plan for the KNPP-2 investment project]. Hozdogovor no. 2082/92-1904. Ruk. V. R. Elohin, otv. isp. L. D. Krivoruckij. Apatity, 1994. Akt sdachi-prijomki ot instituta “Atomjenergoproekt” ot 10.01.1995. (In Russ.).
5. Barannik B. G., Elohin V. R., Krivoruckij L. D., Minin V. A., Rabchuk V. I. *Osnovnye napravlenija razvitija jenergetiki Barencregiona* [The main directions of energy development in the Barents region]. Apatity, 1997, 40 p. (In Russ.).

6. Postanovlenie Pravitel'stva RSFSR ot 28 dekabrya 1991 g. No. 78 "Ob utverzhenii Polozheniya o vypuske i obrashchenii cennyh bumag i fondovyh birzhah v RSFSR". (In Russ.). Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_214/ (accessed 12.12.2022).
7. Salimov L. N. Investicionnye mehanizmy: sushhnost', komponenty i klassifikacija (okonchanie) [Investment mechanisms: essence, components and classification]. *Vestnik TISBI* [Bulletin of TISBY], 2004, issue 1, pp. 42–53. (In Russ.).
8. Pobedonosceva V. V., Pobedonosceva G. M. *Mehanizmy investirovanija v jenergeticheskom komplekse regiona Krajnego Severa* [Investment mechanisms in the energy complex of the Far North region]. Apatity, pbl. Kol'skogo nauchnogo centra RAN, 2014, 118 p. (In Russ.).
9. Nikolaev M. A., Malyshev D. P. Metodologija postroenija mehanizma upravlenija investicionnoj dejatel'nost'ju v regione [Methodology for building a mechanism for managing investment activity in the region]. *Vestnik PskovGU. Serija: Jekonomika. Pravo. Upravlenie*. [Bulletin of Pskov State University. Series of Economics. Right. Management.], 2014, no. 4. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-postroeniya-mehanizma-upravleniya-investitsionnoy-deyatelnostyu-v-regione> (accessed 24.10.2022).
10. Shehovcova L. V. Nauchno-prakticheskij instrumentarij mehanizma investirovanija obnovlenija osnovnyh fondov v stroitel'stve [Scientific and practical tools of the mechanism of investment renewal of fixed assets in construction]. *Transport Business in Russia*, 2015, no. 1, pp. 81–84. (In Russ.).
11. Homenko V. V. Istochniki finansirovanija investicionnyh projektov kak instrument razvitija regiona [Sources of financing of investment projects as a tool for the development of the region]. *Problemy sovremennoj jekonomiki* [Problems of Modern Economy], 2019, no. 1 (69), pp. 153–155. (In Russ.).
12. Pobedonosceva V. V., Pobedonosceva G. M. Methods tariff as a mechanism for financing the investment program subjects for municipal energy Russia. *Magyar Tudományos Journal, (European multi scientific journal) (Budapest, Hungary)*, 2017, no. 4, pp. 17–23.
13. Pobedonosceva V. V. Algoritm prinjatija reshenij na predinvesticionnoj stadii realizacii investicionnyh projektov [Decision-making algorithm at the pre-investment stage of investment projects implementation]. *Materialy IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy internet-konferencii. (Ufa, 15 oktabria — 15 noiabria 2010 g.)* [Proceedings of the IV All-Russian scientific and practical Internet conference]. Ufa, ISJeI UNC RAN, 2010, part 1, pp. 145–148. (In Russ.).
14. Pobedonosceva V. V. Vozmozhnye podhody k organizacii investirovanija jenergeticheskikh objektov regiona [Possible approaches to the organization of investment of energy facilities in the region]. *Rossijskij jekonomicheskij internet-zhurnal — Internet-zhurnal AT i SO* [Russian Economic Online Magazine — AT and SO Online Journal], 2009, no. 3, pp. 576–583. (In Russ.). Available at: <http://www.e-rej.ru/Articles/2009/Pobedonostseva.pdf>.
15. Pobedonosceva V. V. *Mehanizm investirovanija v regional'nom jenergeticheskom komplekse: dis. ... kand. jekon. nauk* [Investment mechanism in the regional energy complex. PhD (Economics) dis.]. Apatity, 2011, 204 p. (In Russ.).
16. Postanovlenie Pravitel'stva RF "O reformirovanii elektroenergetiki Rossijskoj Federacii" ot 11.07.2001 No. 526 (s izmeneniyami na 20 marta 2013 goda). (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901792626> (accessed 12.12.2022).

Информация об авторе

В. В. Победоносцева — кандидат экономических наук, старший научный сотрудник.

Information about the author

V. V. Pobedonostseva — PhD (Economics), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 08.10.2022.
The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 08.10.2022.

Научная статья
УДК 621.311.212 : 338.00.36
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.004

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ МАЛЫХ РЕК ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Ольга Евгеньевна Коновалова

Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия, o.konvalova@ksc.ru

Аннотация

Дана оценка водных ресурсов на территории Архангельской области. Определены гидроэнергоресурсы (ГЭР) крупных, средних и малых рек. Показаны характеристики ранее существовавших колхозных и совхозных гидроэлектростанций (ГЭС). Рассмотрены некоторые проектные варианты строительства новых малых ГЭС на территории области и их экономические параметры.

Ключевые слова:

водные ресурсы, гидроэнергоресурсы, гидротехнические сооружения, малая гидроэнергетика

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Коновалова О. Е. Перспективы использования энергии малых рек для электроснабжения удаленных потребителей Архангельской области // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 43–51. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.004

Original article

PROSPECTS OF USING THE ENERGY OF SMALL RIVERS FOR ELECTRICITY SUPPLY TO REMOTE CONSUMERS OF THE ARKHANGELSK REGION

Olga E. Konvalova

Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, o.konvalova@ksc.ru

Abstract

The article provides an assessment of water resources on the territory of the Arkhangelsk region. The hydro-energy resources of large, medium and small rivers are determined. The characteristics of previously existing collective-farm and state-farm hydroelectric power plants are shown. Some design options for the construction of new small hydroelectric power plants in the region and their economic parameters, are considered.

Keywords:

water resources, hydropower resources, hydraulic structures, small hydropower

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Konvalova O. E. Prospects of using the energy of small rivers for electricity supply to remote consumers of the Arkhangelsk region // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 43–51. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.004

Архангельская область является крупнейшей по площади областью Европейского Севера России. Здесь насчитывается около 70 тыс. больших и малых рек суммарной протяженностью 275 тыс. км. По территории области протекают наиболее многоводные реки северного региона России — Северная Двина, Печора, Онега, Мезень, Кулой, Пинега — с суммарным среднегодовым стоком более 285 млрд м³, а это более 85 % полных потенциальных ГЭР области. Широкая и глубокая река Северная Двина является основным водным путем.

Валовый теоретический энергопотенциал крупных рек области, по оценке института «Гидропроект» 1986 г., составлял 24 млрд кВт · ч. Крупные и средние реки области многоводны, но обладают широкими

поймами и небольшим удельным падением по длине реки. Кроме того, в бассейнах рек Северной Двины и Печоры обнаружены обширные карстовые явления, что затрудняет их гидроэнергетическое использование. К тому же многие крупные и средние реки являются естественными нерестилищами ценных пород рыб и закрыты для гидротехнического строительства.

В области насчитывается значительное количество малых и средних рек, пригодных для энергетического использования. Их валовый теоретический энергопотенциал оценивался в 11,8 млрд кВт · ч, а технический — в 5,31 млрд кВт · ч. Специалистами Института физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук в середине 1990-х гг. был оценен полный теоретический и технический потенциал 43 рек Архангельской области. Теоретический потенциал составлял 1,76 млн кВт · ч, а технический — 0,79 млн кВт · ч среднегодовой выработки энергии [1].

Последние исследования, проведенные с учетом изменения водности рек в связи с изменением климата, оценивают валовый теоретический потенциал малых и средних рек в 1,88 млрд кВт · ч, технико-экономический потенциал — в 0,85 млрд кВт · ч, эколого-экономический потенциал (учитывающий современные экологические требования к строительству) — в 0,46 млрд кВт · ч энергии в год [1].

До сих пор энергетический потенциал малых рек остается невостребованным, хотя в 1950–1960-х гг. на территории области действовало около шестидесяти малых ГЭС мощностью от 6,5 до 107 кВт при напорах от 1,5 до 7 м (Соловецкая ГЭС одна из них). Большая часть ГЭС была приплотинного типа и строилась из дерева. Одна ГЭС была деривационного типа с напором 5 м. Еще существовала станция, построенная из дерева и бетона. Но все они со временем пришли в негодность и были разрушены (табл. 1). В настоящее время в Архангельской области действующих ГЭС нет, но существуют изолированные от энергосистемы потребители. Это рыболовецкие колхозы на побережье Белого моря, которые до сих пор существуют и работают, и ряд других потребителей в четырех районах децентрализованного электроснабжения в глубине от побережья: Шенкурском (по течению реки Ледь), Мезенском (по течению реки Пезы), Лешуконском и Верхнетоемском.

Здесь расположены населенные пункты леспромхозов (ЛПХ) и совхозов, преобразованные сегодня в общества с ограниченной ответственностью (ООО), простые товарищества (ПРТ), сельскохозяйственные производственные кооперативы (СПК) и т. д. В связи с этим актуальным остается вопрос строительства малых ГЭС на реках Пурнеме (Онежский район) и Кулосега (Пинежский район).

Малая ГЭС на реке Пурнеме

Река Пурнема отличается благоприятными топографическими и гидрологическими характеристиками, открыта для энергетического использования. Берега ее долины позволяют создать достаточно объемное и компактное водохранилище, обеспечив при этом значительный напор. Длина реки 27,3 км, площадь водосбора составляет 160 км², средний многолетний расход 1,89 м³/с. Река берет свое начало из озера Тарасово, что делает ее сток более равномерным в течение года.

Створ предполагаемой ГЭС находится на расстоянии 4,5 км от деревни Пурнема, на месте старой ГЭС (табл. 1). Мощность новой ГЭС приплотинного типа составляет 660 кВт. Этого достаточно для электроснабжения четырех близлежащих населенных пунктов — Верхнеозерска, Нижмозера, Лямцы и Пурнемы, которые входят в Покровское сельское поселение с населением 1357 человек (на 1 января 2021 г.). Электроснабжение трех из них (Пурнемы, Лямцы и Верхнеозерска) осуществляется с помощью дизель-генераторных установок (ДГУ), которые выработали свой ресурс, а в деревне Нижмозеро дизельная электростанция (ДЭС) уже не работает (табл. 2).

В здании ГЭС устанавливаются две горизонтальные радиально-осевые турбины с диаметром рабочего колеса 0,5 м. Вода к турбинам подводится с помощью двух турбинных трубопроводов диаметром 1 м и длиной 100 м от глубинного берегового водоприемника, а третий водовод предусмотрен для сброса паводков.

Таблица 1

Характеристика ранее существовавших колхозных и совхозных ГЭС Архангельской области
 Characteristics of the previously existing collective farm and state farm hydroelectric power plants of the Arkhangelsk region

№ п/п	ГЭС	Река	Мощность, кВт	Выработка, млн кВт · ч	Напор, м	Тип	Материал	Рыбохозяйственное значение
1		2	3		4	5	6	7
<i>Ленский район</i>								
1	Кижмольская	Кижмола	100	0,6	5,0	Приплотинная	Дерево, бетон	–
<i>Шенкурский район</i>								
2	Суладская	Суланда	50	0,30	3,0	Приплотинная	Дерево	Закр.
3	Починская	Поча	102	0,61	4,5	Смешанная	То же	
4	Шенкурская	Ручей без названия	30	0,18	4,0	Приплотинная	»	Закр.
<i>Вельский район</i>								
5	Совхоз Дзержинского	Ненокша	45	0,27	4,5	Приплотинная	Дерево	–
6	Совхоз Хазьминского	Елюга	73	0,44	3,5	То же	То же	–
7	Семженская	Семженьга	–	–	–	–	–	Закр.
8	Киенгская	Киеньга	38	0,23	6,0	Приплотинная	Дерево	
<i>Устьянский район</i>								
9	Совхоз «Дмитриевский»	Мехреньга	71	0,43	4,0	Приплотинная	Дерево	Закр.
10	Совхоз Дмитрова	Кочкурга	50	0,3	4,0	То же	То же	
11	Виравская	Соденьга	25	0,15	3,0	»	»	
12	Ростовская	Заячья	–	–	–	»	»	
13	Березницкая	Верюга	23	0,14	2,75	»	»	
14	Березницкая	Воброз	4,0	0,24	2,5	»	»	–
15	Верюгская	Верюга	23	0,14	2,75	»	»	Закр.
16	Колхоз им. Суворова	Велюга	50	0,30	2,7	»	»	То же

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Виноградовский район</i>								
17	Совхоз «Виноградовский»	Нондрус	107	0,64	3,0	Приплогинная	Дерево	
18	То же	Теда	48	0,29	5,5	То же	То же	
19	»	Топса	48	0,29	3,5	»	»	
20	Ваенгская	Шеньга	20	0,12	4,0			
21	Усть-Ваенгская	Ваенга	22	0,13	4,0	Приплогинная	Дерево	Закр.
<i>Плесецкий район</i>								
22	Совхоз «Федоровский»	Шандома	48	0,29	5,0	Деревационная	Дерево	
23	Совхоз «Петровский»	Пукса	40	0,24	3,5	Приплогинная	То же	Закр.
24	Березовская	Кобылья	4,5	0,03	1,65	То же	»	
<i>Коношский район</i>								
25	Совхоз «Лавренгский»	Лавренгга	44	0,26	6,0	Приплогинная	Дерево	
26	Колхоз «Красное знамя»	Шовна	32	0,19	3,0	То же	То же	
27	Колхоз «Путь к коммунизму»	Шеноша	6	0,04	–	»	»	Закр.
<i>Холмогорский район</i>								
28	Тегринская	Тетра	60	0,36	5,0	Приплогинная	Дерево	Закр.
29	Койпокурская	Койпокур	43	0,26	4,5	То же	То же	
30	Чухгеремская	Юрас	42	0,25	4,5	»	»	Закр.
31	В. Мейегорская	Лена	15	0,09	1,5	»	»	
32	Исаковская	Ручей Овраг	15	0,09	4,8	»	»	
33	В. Мейегорская	Ручей Полевой	20	0,12	4,0	»	»	
34	Кехтская	Кехта	60	0,36	4,0	»	»	
35	Леновская	Лена	36	0,22	4,0	»	»	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
36	Колхоз «Авангард»	Нельнога	25	0,15	3,5	Приплотинная	Дерево	
<i>Верхнетоемский район</i>								
37	Авнюгская	Авнюга	90	0,54	7,0	Приплотинная	Дерево	Закр.
38	Федьковская	То же	—	—	—	—	—	Закр.
39	Лохомская	Лохома	28	0,17	2,3	Приплотинная	Дерево	
40	Поленчская	Поленча	35	0,21	3,2	То же	То же	
<i>Красноборский район</i>								
41	Совхоз «Черевковский»	Лудонч	60	0,36	4,0	Приплотинная	Дерево	
42	Шичуйская	Шичуга	15	0,09	4,0	То же	То же	
<i>Приморский район</i>								
43	Лопшеньгская	Лопшеньга	30	0,18	3,5	Приплотинная	Дерево	
<i>Онежский район</i>								
44	Пурнемская	Пурнема	25	0,15	4,5	Приплотинная	Дерево	
45	Тамницкая	Тамница	28	0,17	4,2	То же	То же	Закр.
<i>Карпогорский район</i>								
46	Нердонемская	Нижняя Шарда	20	0,12	4,0	Приплотинная	Дерево	Закр.
47	Быстровская	Ручей Борисов	25	0,15	4,0	То же	То же	
48	Ухотская	Ухта	150,09	4,0	»	»	»	Закр.
<i>Мезенский район</i>								
49	Совкольская	Немнюга	—	—	—	—	—	Закр.
50	Койдинская	Койда	100	0,6	4,0	Приплотинная	Дерево	Закр.
51	Октябрьская	Ручей без названия	25	0,15	—	То же	То же	
<i>Вилегорский район</i>								
52	Колхоз «Завезы Ленина»	Ановаж	52	0,31	3,0	Приплотинная	Дерево	
<i>Емецкий район</i>								
53	Чачевская	Чача	55	0,33	3,0	Приплотинная	Дерево	Закр.
<i>Няндомский район</i>								
54	Шовшинская	Шовша	30	0,18	6,0	То же	То же	
55	Мошинская	Моша	32	0,19	4,0	»	»	Закр.

Примечание. Закр. — закрыто для энергетического использования.

Таблица 2

Характеристика системы электроснабжения некоторых населенных пунктов
 Покровского сельского поселения Архангельской области [2]
 Characteristics of the power supply system of some settlements of the Pokrovsky rural settlement
 of the Arkhangelsk region [2]

Населенный пункт	Пурнема	Лямца	Верхнеозерский
Установленная мощность ДЭС	120 кВ (2 × 60)	60 кВ (2 × 30)	830 кВ (2 × 315, 200)
Производство электрической энергии, тыс. кВт · ч в год	162,024	87,488	677,917
Потребление дизельного топлива, тыс. тонн	78,527	47,534	264,909
Протяженность электрических сетей	4,45	3,84	7,15
В том числе			
0,4 кВ	4,45	3,847	4,82
10 кВ	–	–	2,337

Основные сооружения представлены на рис. 1. Русло реки перекрывается каменно-набросной плотиной общей длиной 400 м и максимальной высотой 43 м, при этом создается водохранилище сезонного регулирования объемом 11,5 м³.

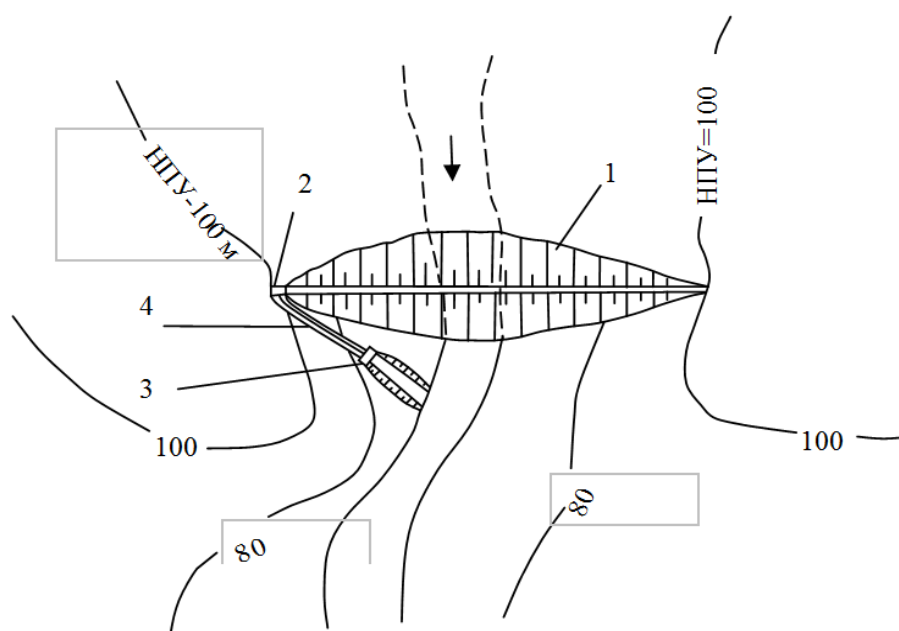


Рис. 1. Основные сооружения малой ГЭС на реке Пурнеме:

1 — каменно-набросная плотина; 2 — водоприемник; 3 — здание ГЭС; 4 — турбинные водоводы

Fig. 1. The main structures of the small hydroelectric power station on the Purnema River:

1 — stone-filled dam; 2 — water intake; 3 — hydroelectric power plant building; 4 — turbine water pipelines

Стоимость строительства малой ГЭС с учетом линии электропередачи от ГЭС до поселка Пурнема в ценах 2021 г. составляет 122,7 млн руб. По инвестиционной программе на 2022–2026 гг. ОАО «Архангельской областной энергетической компании», обслуживающей зону децентрализованного электроснабжения, предусматривается закрытие ДЭС в деревне Лямца и строительство ЛЭП 10кВ «Пурнема — Лямца» длиной около 24 км общей стоимостью 174,3 млн руб.

Малая ГЭС на реке Кулосега

Река Кулосега является левым притоком реки Пинеги, в ее устье расположен поселок Кулосега. В непосредственной близости от него находятся еще три поселка — Сульца, Мамониha и Сосновка, образующие Сосновское сельское поселение. Электроснабжение этих поселков осуществляется от ДЭС «Мамониha». Стоимость произведенной здесь электроэнергии составляет 22 руб / кВт · ч [3].

Строительство малой ГЭС на реке Кулосега мощностью 280 кВт при совместной работе с существующей ДЭС могло бы удовлетворить потребность в электроэнергии всех этих поселков с общим населением 1147 человек (по данным на 1 января 2021 г.).

Основными сооружениями предлагаемой малой ГЭС являются: 1) приплотинное здание ГЭС с двумя радиально-осевыми турбинами и диаметром рабочего колеса 0,5 м; 2) каменно-набросная плотина длиной 400 м и максимальной высотой 23 м; 3) водосливная плотина практического профиля с одним водосливному отверстием размером 2 × 4 м; 4) глубокий береговой водоприемник (рис. 2).

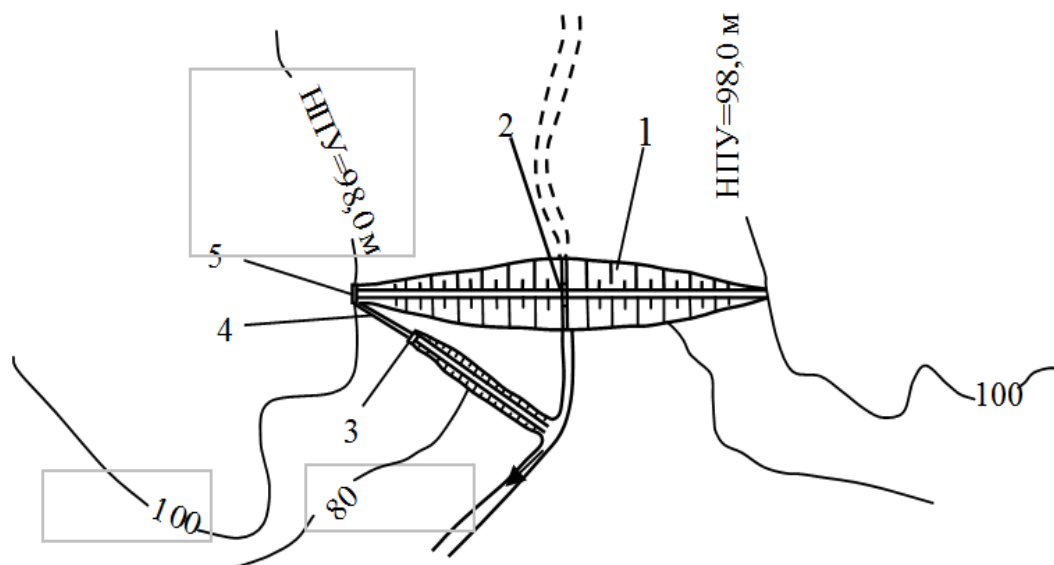


Рис. 2. Схема расположения основных сооружений малой ГЭС на реке Кулосега:

1 — каменно-набросная плотина; 2 — водосбросная плотина; 3 — здание ГЭС; 4 — турбинные трубопроводы; 5 — глубокий водоприемник

Fig. 2. The layout of the main structures of the small hydroelectric power station on the Kulosega River:

1 — rock-fill dam; 2 — spillway dam; 3 — hydroelectric power plant building; 4 — turbine pipelines; 5 — deep water intake

Расчетный напор ГЭС 20 м. При плотине создается водохранилище объемом 9,4 млн м³, что позволяет осуществлять сезонное регулирование. Среднегодовой расход реки 1,6 м³/с. Установленная мощность ГЭС 280 кВт в двух агрегатах, среднегодовая выработка 840 тыс. кВт · ч. Стоимость строительства в ценах 2021 г. составляет около 75,76 млн руб.

Экономические расчеты на основе метода чистого дисконтированного дохода (ЧДД) по критериям срока окупаемости и чистой прибыли свидетельствуют о рентабельности проектов и возможности их строительства для электроснабжения удаленных потребителей. В расчетах учитывалось, что строительство будет осуществляться за счет кредитных средств под 10 % годовых, с учетом изменения уровня инфляции по данным Центрального банка Российской Федерации в 4,7–5,2 % в 2021 г., 4 % — в 2022 и 2023 гг. и далее при постепенном снижении до уровня 2,5 %. Тариф на электроэнергию принимался исходя из метода долгосрочной индексации необходимой валовой выручки на срок возврата инвестированного капитала.

Таким образом, при установке повышенных долгосрочных тарифов на электроэнергию для малых ГЭС на реках Пурнеме и Кулосега, например, на уровне 7,5 и 10,0 руб / кВт · ч, что значительно ниже стоимости электроэнергии, вырабатываемой от ДЭС, в удаленных поселках

Архангельской области (15–30 руб / кВт · ч) [4], сроки окупаемости предлагаемых проектов составят 9 и 10 лет (рис. 3). Прибыль к концу срока эксплуатации малой ГЭС на реке Пурнеме составит 223,5 млн руб., или 182 % от инвестиций, а на реке Кулосеге — 119,72 млн руб., или 158 % от инвестиций. Благодаря этому малые ГЭС могут быть построены в ближайшем будущем.

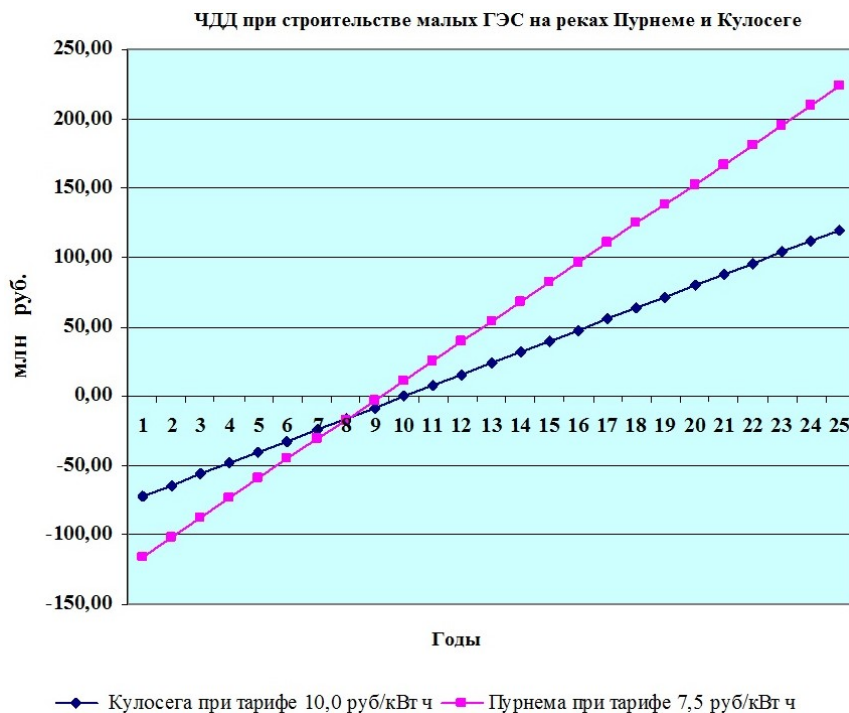


Рис. 3. Чистый дисконтированный доход при строительстве малых ГЭС с включенной инвестиционной составляющей в тариф

Fig. 3. Net discounted income in the construction of small hydroelectric power plants with an investment component included in the tariff

Выводы

1. Использование гидроэнергии малых рек Архангельской области для электроснабжения изолированных потребителей возможно, об этом свидетельствуют многочисленные колхозные и совхозные малые ГЭС, существовавшие в середине XX в.

2. Техничко-экономические расчеты показывают, что и современные малые ГЭС могут быть выгодны для территорий, где нет централизованного электроснабжения. Так, проекты малых ГЭС на реках Пурнеме и Кулосеге окупятся через 9 и 10 лет даже при тарифах в два раза ниже себестоимости электроэнергии от существующих на местах ДЭС. При этом прибыль к концу срока эксплуатации станций составит 182 % от инвестиций на реке Пурнеме и 158 % — на реке Кулосеге.

Список источников

1. Коновалова О. Е., Победоносцева В. В. Возможности малой гидроэнергетики Архангельской области // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2017. № 5 (56). С. 181–190.
2. Акентьева Е. М., Иванова Е. В. Оценка влияния ожидаемого к середине XXI века изменения климата на потенциал гидроэнергетики (на примере Архангельской области) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2010. № 561. С. 115–123.
3. Схема территориального планирования Онежского муниципального района. СПб.: ОАО «РосНИИУрбанистики», 2014. Т. 1. С. 298 // Руководство по эксплуатации. URL: <https://rykovodstvo.ru/exspl/15212/index.html> (дата обращения: 03.08.2021).

4. В Архангельской области разница между стоимостью производства и продажей электроэнергии не компенсируется из бюджета, включена в состав единых тарифов // Информационное Агентство «Эхо Севера». URL: <https://www.echosevera.ru/news/2014/02/04/8710.html> (дата обращения: 24.10.2022).

References

1. Konovalova O. E., Pobedonosceva V. V. *Vozможности maloj gidrojenergetiki Arhangel'skoj oblasti* [The possibilities of small hydropower in the Arkhangelsk region]. *Sever i ryнок: formirovanie jekonomicheskogo porjadka* [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2017, no. 5 (56), pp. 181–190. (In Russ.).
2. Akent'eva E. M., Ivanova E. V. *Ocenka vlijaniya ozhidaemogo k seredine XXI veka izmenenija klimata na potencial gidrojenergetiki (na primere Arhangel'skoj oblasti)* [Assessment of the impact of climate change expected by the middle of the XXI century on the potential of hydropower (on the example of the Arkhangelsk region)]. *Trudy Glavnoj geofizicheskoj observatorii im. A. I. Voeykova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeykov], 2010, no. 561, pp. 115–123. (In Russ.).
3. *Shema territorial'nogo planirovanija Onezhskogo municipal'nogo rajona*. Saint Petersburg, OAO RosNIPIUrbanistiki, 2014, vol. 1, pp. 298. (In Russ.). Available at: <https://rykovodstvo.ru/exspl/15212/index.html> (accessed 03.08.2021).
4. *V Arhangel'skoj oblasti raznica mezhdju proizvodstva i prodazhej jelektroenergii ne kompensiruetsja iz bjudzheta, vkljuchena v sostav edinyh tarifov*. (In Russ.). Available at: <https://www.echosevera.ru/news/2014/02/04/8710.html> (accessed 24.10.2022).

Информация об авторе

О. Е. Коновалова — инженер I категории.

Information about the author

O. E. Konovalova — Engineer of the first category.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 08.10.2022.
The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 08.10.2022.

Научная статья
УДК 620.952
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.005

РАЗВИТИЕ БИОЭНЕРГЕТИКИ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Никита Игоревич Лазарев

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия, n.lazarev@ksc.ru*

Аннотация

Рассмотрены особенности и перспективы развития теплоснабжения Мурманской области. Представлен современный способ использования биомассы с помощью технологии торрефикации на существующих котельных. Показаны основные преимущества использования торрефицированного биотоплива.

Ключевые слова:

биоэнергетика, биомасса, котельные, торф, торрефикация

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Лазарев Н. И. Развитие биоэнергетики в Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 52–58. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.005

Original article

DEVELOPMENT OF BIOENERGY IN THE MURMANSK REGION

Nikita I. Lazarev

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, n.lazarev@ksc.ru*

Abstract

The features and prospects of the development of heat supply in the Murmansk region are considered. A modern way of using biomass applying the technology of charging for existing boiler houses, is presented. The main advantages of using torrefied biofuels, are shown.

Keywords:

bioenergy, biomass, boiler houses, peat, torrefication

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Lazarev N. I. Development of bioenergy in the Murmansk region // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 52–58. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.005

Для ускорения экономического развития территорий Арктической зоны Российской Федерации одной из задач государственной политики в области топливно-энергетического комплекса является модернизация объектов локальной генерации с расширением использования возобновляемых источников энергии, сжиженного газа и местного топлива [1].

Согласно концепции развития локального теплоснабжения Архангельской области к 2030 г. планируется сократить долю привозных видов топлива (угля, мазута, дизельного топлива) до 2 %, а долю использования древесных отходов увеличить до 44 % с внедрением технологий производства биотоплива из отходов лесопереработки. Топливный баланс региона должен выглядеть так: 54 % — природный газ, 44 % — биотопливо, 2 % — каменный уголь [2].

В 2035 г. при реализации государственной политики развития топливно-энергетического комплекса арктических регионов планируется завершение замещения на изолированных и труднодоступных территориях неэффективной дизельной генерации электроэнергии генерацией на базе сжиженного природного газа, возобновляемых источников энергии и местного топлива [1].

В Мурманскую область поставки топлива (угля, мазута, дизельного топлива и др.) для источников теплоснабжения производятся на расстояние более 1500 км. Высокая транспортная составляющая

в стоимости топлива и рыночная система ценообразования на него приводят к необходимости предоставлять теплогенерирующим предприятиям субсидии на компенсацию недополученных доходов.

Структура потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на выработку тепловой энергии показана на рис. 1.

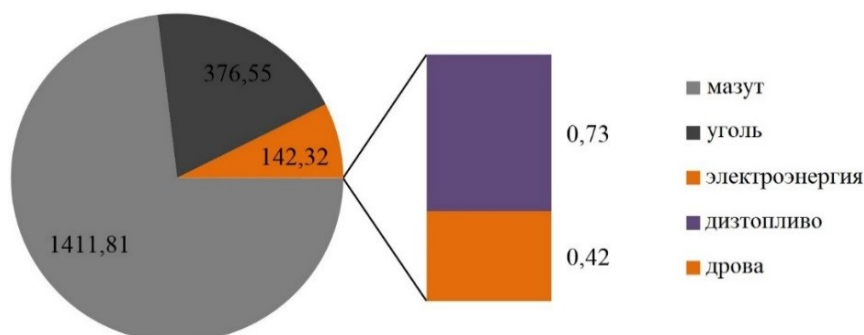


Рис. 1. Структура потребления ТЭР на выработку теплоэнергии, тыс. т. у. т. [3]

Fig. 1. Structure of fuel and energy consumption for heat power generation, thousand toe [3]

В Мурманской области преобладают котельные на мазуте и угле [4]. Их большая часть имеет низкий коэффициент полезного действия, некоторым требуется капитальный ремонт. Доля мазута в топливном балансе области составляет более 70%. Дорогостоящий мазут формирует высокие тарифы на тепло.

Теплоснабжение потребителей труднодоступных территорий Мурманской области осуществляется от дизельных и гибридных электростанций, которые включают дизель-генераторы, ветровые и солнечные установки.

Основными направлениями снижения потребления мазута и дизельного топлива для выработки тепловой и электрической энергии являются: развитие локальных энергосистем с распределенной генерацией на базе местных энергоресурсов (ветровой энергии [5, 6], малых гидроэлектростанций [7]); управление энергоэффективностью с внедрением наилучших доступных технологий [8, 9].

Одним из пунктов комплексного инвестиционного проекта модернизации системы теплоснабжения Мурманской области на 2015–2030 гг. является осуществление перехода на твердое топливо. 27 июля 2016 г. в целях реализации проекта создано ООО «Мурманская биоэнергетическая компания», стратегия которого заключается в развитии малой распределенной биоэнергетики на базе местных видов топлива [10].

У компании есть реализованные проекты в Мурманской области: в Умбе введены в эксплуатацию новые биотопливные котельные (табл. 1). Мультиотопливные котельные предусмотрены для сжигания угля марок Б и К, фрезерного торфа, щепы, пеллетов. Новые котельные оснащены современным теплотехническим оборудованием, отвечающим всем основным требованиям энергоэффективности. Объем топливного склада рассчитывается на недельный расход топлива.

Таблица 1

Характеристика котельных населенного пункта Умба
 Characteristics of boiler houses of the settlement of Umba

Источник тепловой энергии	Тепловая мощность нетто, Гкал / ч	Перспективная подключенная нагрузка, Гкал / ч	Потери в тепловых сетях, Гкал / ч	Перспективная подключенная нагрузка с учетом потерь, Гкал / ч	Резерв / дефицит, Гкал / ч
Котельная № 1	2,477	1,165	0,361	1,526	0,951
Котельная № 2	4,128	2,153	1,161	3,314	0,814
Котельная № 3	14,923	11,835	2,151	13,986	0,937
Котельная № 4	0,172	0,081	–	0,081	0,091

Преимуществами таких котельных являются экономичность, удобство и высокий коэффициент полезного действия. Тепловая мощность установок в пределах от 0,1 до 20 МВт. Источник тепловой энергии № 3 имеет самую высокую тепловую мощность.

В Мурманской области имеются неиспользуемые торфяные месторождения. Перспективы добычи торфа на территории области обусловлены наличием 620 месторождений общей площадью 379 575 га с оценочными запасами 853,403 млн т торфа [11]. Основная часть из них сосредоточена на 26 месторождениях общей площадью 330 тыс. га и запасами 788 млн т (влажностью 40 %). Изученность запасов торфа на территории области очень слабая. Торф — это возобновляемый природный биоресурс, который образуется в процессе естественного отмирания и неполного распада болотных растений в условиях повышенной влажности и недостатка кислорода. В большинстве стран мира торф признан условно возобновляемым ресурсом. В качестве топлива на котельных в Умбе используется торфяное топливо, сырьевая база на территории Терского района представлена группой торфяных месторождений: Кислое, Кирвенское, Кумнозерские Болота (158), Щучье (161), Гладкое (162) (рис. 2).



Рис. 2. Торфяные месторождения на территории Терского района
Fig. 2. Peat deposits on the territory of the Tersky district

Процесс извлечения экологичного топлива усложнен тем, что в естественном виде оно содержит до 90 % воды. Использовать его без предварительной обработки невозможно. Перед отправкой в котельные торф ворошат для дополнительной сушки.

Преимуществом котельных на торфе по сравнению с другими видами топлива является экологичность (табл. 2). В угле и мазуте содержится сера, сгорая, она преобразуется в двуокись азота, затем вступает в реакцию с влагой и превращается в сернистую кислоту, затем наблюдаются кислотные дожди. В торфе серы практически нет.

Таблица 2

Показатели работы котельных на различных видах топлива
Performance indicators of boiler houses on various types of fuel

Показатель	Торфяное топливо	Уголь	Мазут	Газ
Калорийность, ккал / кг	4100–5000	4000–5800	9600	7600
Выбросы SO ₂	0,2	11,9	4,69	0
Выбросы NO _x	0,45	0,57	0,27	0,38
Выбросы CO ₂	1,54	2,33	1,3	1,45
Зольность, %	4–8	15–50	До 0,15	–

В Мурманской области планируется строительство новых твердотопливных котельных в Ревде, Ловозере и Высоком, а также модернизация котельных № 1 и 2 в Кандалакше. В качестве топлива будут использоваться торф, щепа, пеллеты, уголь, а также RDF-топливо, получаемое из мусора. Заявка на финансирование строительства твердотопливных котельных, а также на модернизацию котельных предварительно одобрена штабом правительственной комиссии по региональному развитию. В Ёнском и Североморске уже запущены новые твердотопливные котельные.



Рис. 3. Мультитопливный твердотопливный котел
Fig. 3. Multi-fuel solid fuel boiler

Источники биомассы для производства энергии включают в себя все многообразие естественной растительной органики. В качестве топлива можно использовать низкосортную древесину, отходы лесозаготовки и лесопереработки, торф [12]. Биоэнергетические ресурсы Мурманской области относительно невелики. Отходы лесной и деревообрабатывающей промышленности используются в качестве топлива для производства электроэнергии и тепловой энергии в незначительных объемах.

Существует два способа применения биомассы для получения тепла и энергии — традиционный и современный. Традиционное применение биомассы в энергетике — прямое сжигание, а современный способ — использование специально подготовленной биомассы.

Приоритетные направления развития отечественной биоэнергетики в соответствии со Стратегической программой исследований (СПИ) представлены в табл. 3, они также отражены в Тематическом плане (ТП) исследований технологической платформы «Биоэнергетика» [13].

Таблица 3

Приоритетные направления деятельности ТП «Биоэнергетика»
Priority areas of activity of TP “Bioenergetics”

Приоритетные технологические направления	Отечественные технологии	
	доступные для внедрения	на стадии разработки
Биомасса, ресурсная база и логистика	+	+
Получение тепловой и электрической энергии из биомассы (в том числе когенерация)		+
Моторное биотопливо	+	+
Биогазовые технологии	+	
Использование биомассы для производства различных видов твердого биотоплива	+	
Энергетическая утилизация отходов (сжигание, газификация, пиролиз)	+	
Торфяная биоэнергетика	+	

Биомасса обладает рядом свойств, из-за которых она недостаточна эффективна. Основными из них являются низкая насыпная и энергетическая плотность, высокая влажность и гидрофильность. В процессе гранулирования часть из них устраняется, но проблема хранения и транспортировки остается. Традиционные технологии пеллетирования биомассы уже внедрены в производство. Один из вариантов улучшения потребительских характеристик брикетированной биомассы является торрефикация. Торрефицированные, или биоугольные, пеллеты обладают рядом достоинств по сравнению с обычными пеллетами. Торрефикация — это термический процесс преобразования биомассы в углеподобный материал, который имеет лучшие топливные характеристики, чем исходная биомасса. Общая схема процесса торрефикации представлена на рис. 4.

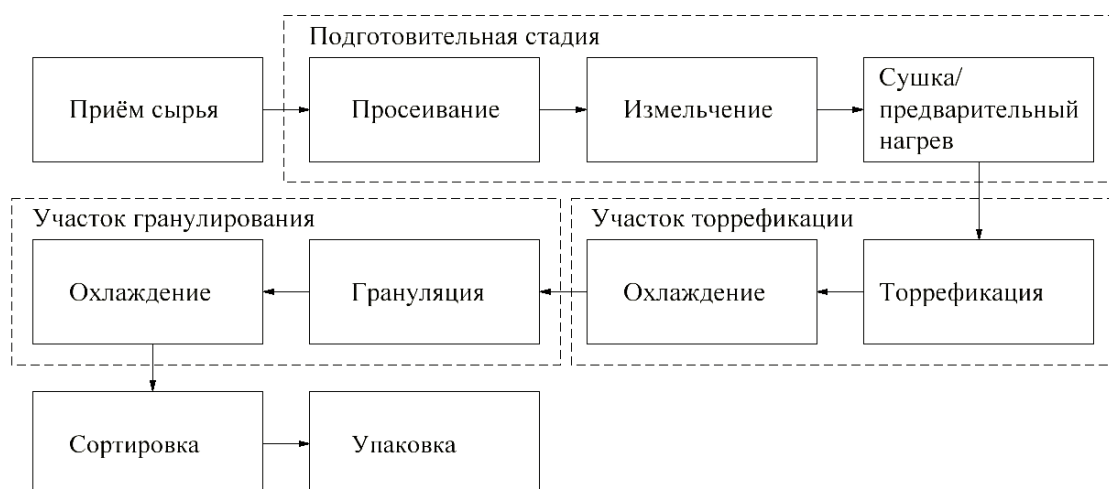


Рис. 4. Общая схема процесса торрефикации
Fig. 4. General scheme of the billing process

В соседнем регионе — Архангельской области — уже вступил в работу первый в стране завод, использующий технологию торрефикации, производительность — 150 тыс. т пеллет в год.

В Мурманской области для сжигания торрефицированных пеллет могут быть использованы котельные, работающие на древесных отходах; оборудование для производства тепловой и электрической энергии для ТЭЦ на биомассе; пеллетные котлы и установки различной степени автоматизации и мощности, коммунальные котельные. Большая эффективность достигается при совместном сжигании торрефицированных пеллетов вместе с углем или нефтепродуктами. Такие решения помогут снизить мазутозависимость.

Использование традиционных углей однородных источников энергии нецелесообразно. Увеличение доли малой распределенной биоэнергетики в регионе уменьшит затраты на энергоресурсы. Основные барьеры для внедрения торрефикации — небольшой научный задел в области биотоплива, недостаточное развитие инфраструктуры, поддерживающей полный цикл биоэнергетических технологий.

Выводы

Биоэнергетика в Мурманской области слабо развита. Здесь преобладают котельные на мазуте и угле. Отказ от транспортировки топлива (угля, мазута и др.) на большие расстояния позволяет повысить надежность энергоснабжения путем задействования местных энергоресурсов.

Развитие биоэнергетики в Мурманской области может осуществляться по следующим направлениям: использование торрефицированных пеллет в качестве топлива для теплоснабжения на существующих котельных, совместное сжигание торрефицированных пеллет с углем или сжигание в пеллетных котлах. Внедрение технологии торрефикации позволит получить пеллеты из биомассы с повышенными теплотехническими характеристиками.

Список источников

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033> (дата обращения: 28.09.2022).
2. Архангельск взял курс на биотопливо, а Алтай — на солнце и ветер // Альтернативная энергия: сайт. URL: https://altenergiya.ru/bio/archangelsk-kurs-na-biotoplivo.html#h2_2 (дата обращения: 07.10.2022).
3. Кузнецов Н. М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2020. 92 с. doi:10.37614/978.5.91137.434.1. EDN: GVUSWV.
4. Разработка комплексного инвестиционного проекта модернизации системы теплоснабжения Мурманской области. РЭТ2. Маркетинговое исследование поставок энергетического сырья в системе теплоснабжения Мурманской области / ФБГУ «РЭА» Минэнерго России. М., 2015. 142 с.
5. Минин В. А. Оценка перспектив использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей Севера // Теплоэнергетика. 2009. № 11. С. 34–40. EDN: KZAYKP.
6. Бежан А. В., Минин В. А. Оценка эффективности системы теплоснабжения на основе котельной и ветроустановки в условиях Севера // Теплоэнергетика. 2017. № 3. С. 51–59. doi:10.1134/S0040363616100015. EDN: XSMWYF.
7. Коновалова О. Е., Кузнецов Н. М. Возобновляемые источники энергии в Мурманской области // Промышленная энергетика. 2018. № 9. С. 51–56. EDN: YOGUDJ.
8. Клюкин А. М., Кузнецов Н. М., Трибуналов С. Н. Повышение эффективности использования энергоресурсов в Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 5–13 (39). С. 107–118. EDN: XHSIET.
9. Кузнецов Н. М., Победоносцева В. В. Эффективность внедрения наилучших доступных энергосберегающих технологий в Мурманской области // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 143–148. doi:10.17513/fr.41564. EDN: ZBMZQP.
10. Развитие малой распределенной энергетики с использованием местных видов топлива (торф, древесина). URL: https://murmanexpo.ru/img/all/37_3__razvitie_maloy_raspredelennoy_energetiki_s_ispolzovaniem_mestnyh_vidov_topliva__torf__drevesina_.pdf (дата обращения: 20.08.2022).
11. Евзеров В. Я. Неиспользованные сырьевые ресурсы Мурманской области // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 2 (10). С. 38–52. doi:10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.2.38-52. EDN: YSHOTB.
12. Кузнецов Н. М. Древесные отходы — дополнительный источник энергии на Северо-Западе России // Горный журнал. 2004. № 5. С. 119–120. EDN: WFNRTD.
13. Дорожная карта развития биоэнергетики технологической платформы «Биоэнергетика» на период 2019–2030 // Технологическая платформа «Биоэнергетика». URL: http://tp-bioenergy.ru/upload/file/dorozhnaya_karta_tp_bioehnergetika.pdf (дата обращения: 20.02.2022).

References

1. Strategija razvitija Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii i obespechenija nacional'noj bezopasnosti na period do 2035 goda. (In Russ.). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033> (accessed 28.09.2022).
2. Arhangel'sk vzjal kurs na biotoplivo, a Altaj — na solnce i veter. (In Russ.). Available at: https://altenergiya.ru/bio/arhangelsk-kurs-na-biotoplivo.html#h2_2 (accessed 07.10.2022).
3. Kuznecov N. M. *Upravlenie jenergojeffektivnost'ju v regionah Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii* [Energy efficiency management in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation]. Apatity, Kol'skij nauchnyj centr Rossijskoj akademii nauk, 2020, 92 p. (In Russ.). doi:10.37614/978.5.91137.434.1. EDN: GVUSWV.
4. Razrabotka kompleksnogo investicionnogo proekta modernizacii sistemy teplosnabzhenija Murmanskoy oblasti. R3T2. Marketingovoe issledovanie postavok jenergeticheskogo syr'ja v sisteme teplosnabzhenija Murmanskoy oblasti [Marketing research of the supply of energy raw materials in the heat supply system of the Murmansk region]. Moscow, 2015, 142 p. (In Russ.).
5. Minin V. A. Ocenka perspektiv ispol'zovanija jenerгии vetra dlja teplosnabzhenija potrebitelej Severa [Assessment of the prospects for the use of wind energy for heat supply to consumers in the North]. *Teplojenergetika* [Thermal Power Engineering], 2009, no. 11, pp. 34–40. (In Russ.). EDN: KZAYKP.
6. Bezhan A. V., Minin V. A. Ocenka jeffektivnosti sistemy teplosnabzhenija na osnove kotel'noj i vetroustanovki v uslovijah Severa [Evaluation of the efficiency of a heat supply system based on a boiler house and a wind turbine in the conditions of the North]. *Teplojenergetika* [Thermal Power Engineering], 2017, no. 3, pp. 51–59. (In Russ.). doi:10.1134/S0040363616100015. EDN: XSMWYF.
7. Konovalova O. E., Kuznecov N. M. Vozobnovljaemye istochniki jenerгии v Murmanskoy oblasti [Renewable energy sources in the Murmansk region]. *Promyshlennaja jenergetika* [Industrial Energy], 2018, no. 9, pp. 51–56. (In Russ.). EDN: YOGUDJ.
8. Kljukin A. M., Kuznecov N. M., Tribunalov S. N. Povyszenie jeffektivnosti ispol'zovanija jenergoresursov v Murmanskoy oblasti [Improving the efficiency of energy use in the Murmansk region]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, no. 5–13 (39), pp. 107–118. (In Russ.). EDN: XHSIET.
9. Kuznecov N. M., Pobedonosceva V. V. Jefferektivnost' vnedrenija nailuchshih dostupnyh jenergosberegajushhih tehnologij v Murmanskoy oblasti [Efficiency of implementation of the best available energy-saving technologies in the Murmansk region]. *Fundamental'nye issledovanija* [Fundamental Research], 2017, no. 6, pp. 143–148. (In Russ.). doi:10.17513/fr.41564. EDN: ZBMZQP.
10. Razvitie maloj raspredel'jonnoj jenergetiki s ispol'zovaniem mestnyh vidov topliva (torf, drevesina). (In Russ.). Available at: https://murmanexpo.ru/img/all/37_3_razvitie_maloy_raspredelennoj_energetiki_s_ispolzovaniem_mestnyh_vidov_topliva_torf_drevesina.pdf (accessed 20.08.2022).
11. Evzerov V. Ja. Neispol'zovannye syr'evye resursy murmanskoy oblasti [Unused raw materials of the Murmansk region]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, no. 2 (10), pp. 38–52. (In Russ.). doi:10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.2.38-52. EDN: YSHOTB.
12. Kuznecov N. M. Drevesnye othody — dopolnitel'nyj istochnik jenerгии na Severo-Zapade Rossii [Wood waste is an additional source of energy in the North-West of Russia]. *Gornyj zhurnal* [Mining Journal], 2004, no. S, pp. 119–120. (In Russ.). EDN: WFNRTD.
13. Dorozhnaja karta razvitija biojenergetiki tehnologicheskoy platformy “Biojenergetika” na period 2019–2030. (In Russ.). Available at: http://tp-bioenergy.ru/upload/file/dorozhnaya_karta_tp_bioehnergetika.pdf (accessed 20.02.2022).

Информация об авторе

Н. И. Лазарев — инженер.

Information about the author

N. I. Lazarev — Engineer.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 08.10.2022.
The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 08.10.2022.

© Лазарев Н. И., 2022

Научная статья
УДК 551.501.83
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.006

АНАЛИЗ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ В 2021 ГОДУ

**Василий Николаевич Селиванов¹, Антон Владимирович Бурцев², Виктор Владимирович Ивонин³,
Виталий Валентинович Колобов⁴**

^{1–4}*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия*

¹*v.selivanov@ksc.ru*

²*a.burtsev@ksc.ru*

³*v.ivonin@ksc.ru*

⁴*v.kolobov@ksc.ru*

Аннотация

Представлены результаты анализа данных о молниевых разрядах на территории Мурманской области, зарегистрированных в 2021 г. некоммерческой сетью грозопеленгации Blitzortung. Несмотря на относительно низкий процент регистрируемых молниевых разрядов, сеть Blitzortung является единственным доступным источником информации о молниевой активности на территории Мурманской области. Выполнен анализ молниевой активности на территории Мурманской области в 2021 г., приведены данные о воздействии молний на объекты Кольской энергосистемы.

Ключевые слова:

молниевая активность, Мурманская область, грозопеленгация, линии электропередачи

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2021 году / В. Н. Селиванов, А. В. Бурцев, В. Н. Ивонин, В. В. Колобов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 59–67. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.006

Original article

LIGHTNING ANALYSIS FOR THE MURMANSK REGION IN 2021

Vasilii N. Selivanov¹, Anton V. Burtsev², Viktor V. Ivonin³, Vitalii V. Kolobov⁴

^{1–4}*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia*

¹*v.selivanov@ksc.ru*

²*a.burtsev@ksc.ru*

³*v.ivonin@ksc.ru*

⁴*v.kolobov@ksc.ru*

Abstract

The article presents the results of the analysis of data on lightning discharges, registered in 2021 on the territory of the Murmansk region by the non-commercial lightning detection network Blitzortung. Despite the relatively low percentage of registered lightning discharges, the Blitzortung network is the only available source of information on lightning activity in the Murmansk region. The analysis of lightning activity in 2021 on the territory of the Murmansk region is carried out, data on the impact of lightning on the objects of the Kola Power System are presented.

Keywords:

lightning activity, Murmansk region, lightning location, overhead transmission lines

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Lightning analysis for the Murmansk region in 2021 / V. N. Selivanov, A. V. Burtsev, V. V. Ivonin, V. V. Kolobov // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 59–67. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.006

Введение

С 2013 г. Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (ЦЭС КНЦ РАН) в инициативном порядке проводит регистрацию разрядов молний на территории Мурманской области [1–3] двумя однопунктовыми грозопеленгаторами дальнего радиуса действия StormTracker канадской фирмы Boltex [4], регистраторами сигналов в нейтралях автотрансформаторов [5] и распределенной сетью грозопеленгаторов в рамках некоммерческого проекта сообщества Blitzortung [6].

К началу грозового сезона 2019 г. силами ЦЭС КНЦ РАН было установлено пять детекторов Blitzortung вблизи населенных пунктов Алакуртти, Умба, Апатиты, Ловозеро, Никель. В мае 2021 г. был установлен детектор в селе Варзуга. К концу 2021 г. на территории Мурманской области функционировали восемь детекторов молний, шесть из которых были установлены сотрудниками ЦЭС КНЦ РАН. На рис. 1 показаны места установки детекторов Blitzortung на карте Мурманской области.



Рис. 1. Детекторы Blitzortung на карте Мурманской области

Fig. 1. Blitzortung detectors on the Murmansk region map

Для анализа молниевой активности разработан метод расчета уровня воздействия молний на воздушные линии электропередачи и другие протяженные объекты по всей их длине и создано программное обеспечение для ЭВМ, реализующее этот метод [7–10]. Разработанный метод позволяет получить информацию о воздействиях молний на любом участке воздушной линии (ВЛ). Он реализован в виде специального программного обеспечения, которое предназначено для получения данных об интенсивности воздействия грозовых разрядов на протяженные объекты и для построения соответствующих графиков. Исходными данными являются координаты промежуточных элементов исследуемого объекта (например, координаты опор линии электропередачи) и координаты грозовых разрядов с точным временем возникновения разряда на исследуемом участке за указанный промежуток времени.

Разработанное программное обеспечение использовалось при создании информационного ресурса “E-GRID Power Network DB — Электрические сети: База данных” (<http://egrid.ienc.kolasc.net.ru>). Его база данных содержит информацию о ВЛ и подстанциях энергосистемы Мурманской области, а также координаты ударов молнии в землю. Эта информация используется для анализа молниевой активности на территории Мурманской области, ниже приведены результаты анализа грозового сезона 2021 г.

Анализ грозовой активности

Грозовой сезон 2021 г. начался 18 мая, а последняя гроза отмечена 31 августа. В табл. 1 представлены данные о грозовой деятельности сети Blitzortung за последние пять лет. Необходимо отметить, что сеть находится в стадии развития, группировка грозопеленгаторов с каждым годом увеличивается, что значительно увеличивает эффективность системы. Кроме того, система грозопеленгации Blitzortung регистрирует только удары молнии в землю, исключая превосходящие их по количеству межоблачные разряды. С большой долей вероятности точными в табл. 1 являются показатели начала и конца грозового сезона, а также число грозовых дней в году. Суммарное число разрядов определяется

эффективностью системы грозопеленгации, то есть долей зарегистрированных разрядов от общего числа (которое в реальности является числом неизвестным, так как пока не существует систем грозопеленгации со стопроцентной эффективностью).

В таблице 2 представлены данные о распределении разрядов по месяцам в течение грозовых сезонов. В 2021 г. уровень грозовой активности был относительно средним. Забегая вперед, количество разрядов на конец июля 2022 г. составило 7360, что сопоставимо с показателями за весь 2018 г.

Таблица 1

Показатели грозовой активности на территории Мурманской области
 Lightning activity in the Murmansk region

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Первая гроза	10.06.	14.05.	11.05.	02.06.	18.05.
Последняя гроза	24.09.	22.09.	13.09.	11.09.	31.08.
Грозовых дней	38	32	28	38	47
Всего разрядов	2555	7476	4287	1440	2944

Таблица 2

Распределение разрядов по месяцам года
 Discharges distribution by months of the year

Год	Месяц					Всего
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	
2017	0 / 0	5 / 83	19 / 1834	11 / 452	3 / 186	38 / 2555
2018	5 / 312	6 / 805	11 / 2922	8 / 3430	2 / 7	32 / 7476
2019	3 / 317	10 / 3127	5 / 27	6 / 799	4 / 17	28 / 4287
2020	0 / 0	8 / 488	16 / 623	12 / 326	2 / 3	38 / 1440
2021	4 / 290	13 / 634	16 / 1351	14 / 669	0 / 0	47 / 2944

Примечание. В числителе — число грозовых дней, в знаменателе — количество разрядов в месяце.
Note. Thunderstorm days / discharges per month.

При анализе аварийности на ВЛ и подстанциях должны учитываться многие климатические условия, в том числе и интенсивность грозовой деятельности. В настоящее время в России оценка уровня воздействия грозовых разрядов на ВЛ регулируется нормативным документом «Правила устройства электроустановок» [11], в котором представлены карты плотности молниевых разрядов, построенные более тридцати лет назад и основанные на визуально-слуховом методе. При этом в мировой практике уже длительное время применяются достаточно точные карты плотности грозовых разрядов и грозовых дней, полученные инструментальными методами.

Приведем результаты анализа двух важнейших показателей молниевой активности — среднегодовое число дней с грозой и плотность разрядов молнии в землю.

На рисунке 2 представлены результаты расчета среднегодового числа грозовых дней на территории Мурманской области за период 2017–2021 гг. За день с грозой принимается любой день с одним или более разрядами молнии в землю. Разряды посчитаны за пятилетний период для ячеек земной поверхности 20×20 км, что приблизительно соответствует области наблюдения за грозовой деятельностью с помощью визуально-слухового метода на гидрометеорологических станциях и постах.

Минимальное значение составляет 0,2 грозовых дня, что соответствует не более чем одному дню с грозой за пять лет на данной территории площадью 400 кв. км. Такие низкие значения характерны для побережья Баренцева моря. На юге Мурманской области грозовая активность значительно выше и достигает шести дней с грозой. При этом максимальное значение числа грозовых дней в отдельно взятый год составляет 11. Если считать, что значение средней продолжительности грозы составляет два часа, то полученные результаты для продолжительности гроз будут соответствовать максимальной оценке в двадцать часов в год для Кольского полуострова на «Карте районирования территории РФ по среднегодовой продолжительности гроз в часах» [11].

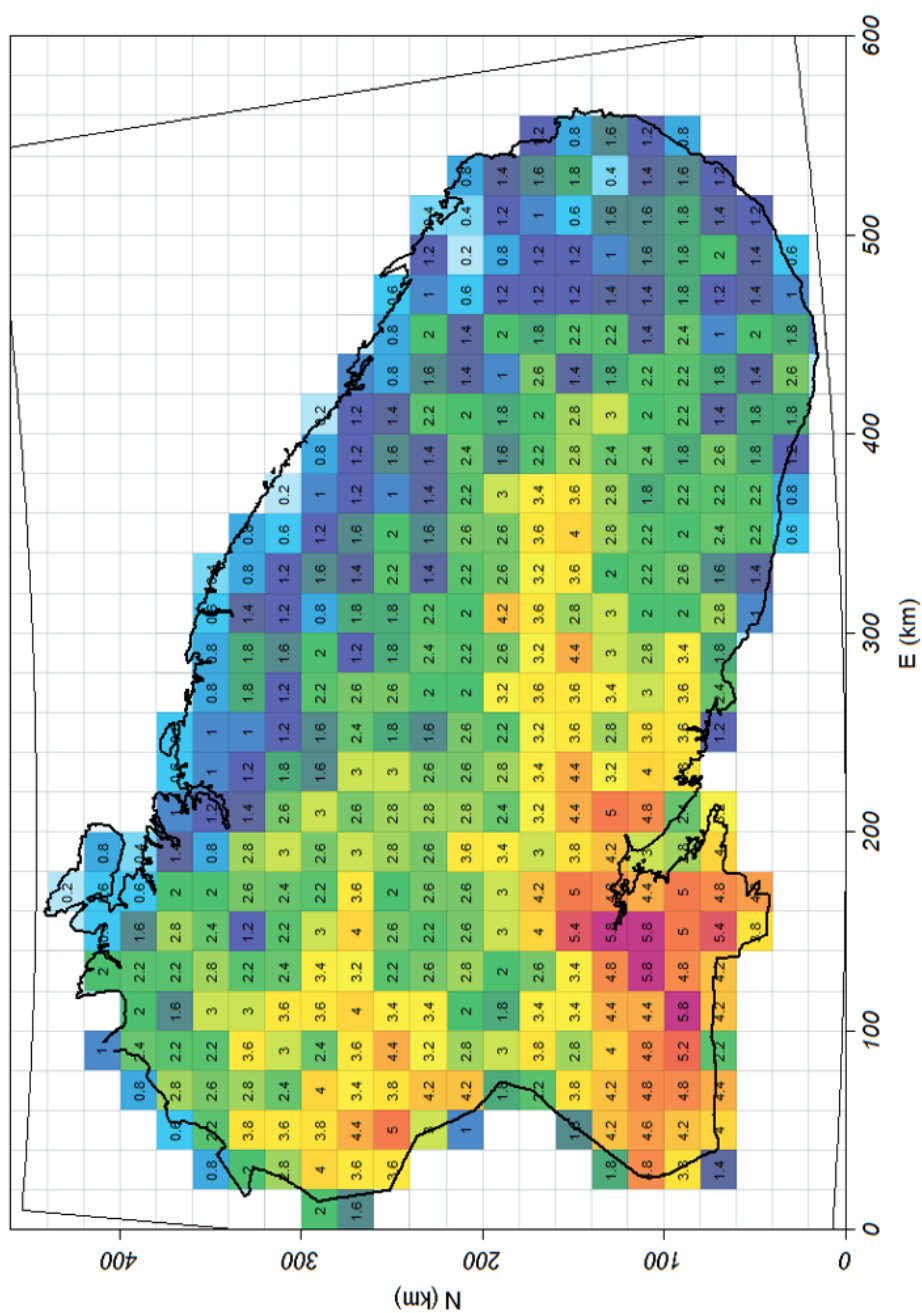


Рис. 2. Среднегодовое число грозных дней по данным за 2017–2021 гг.
Fig. 2. The average annual number of thunderstorm day over the period 2017–2021

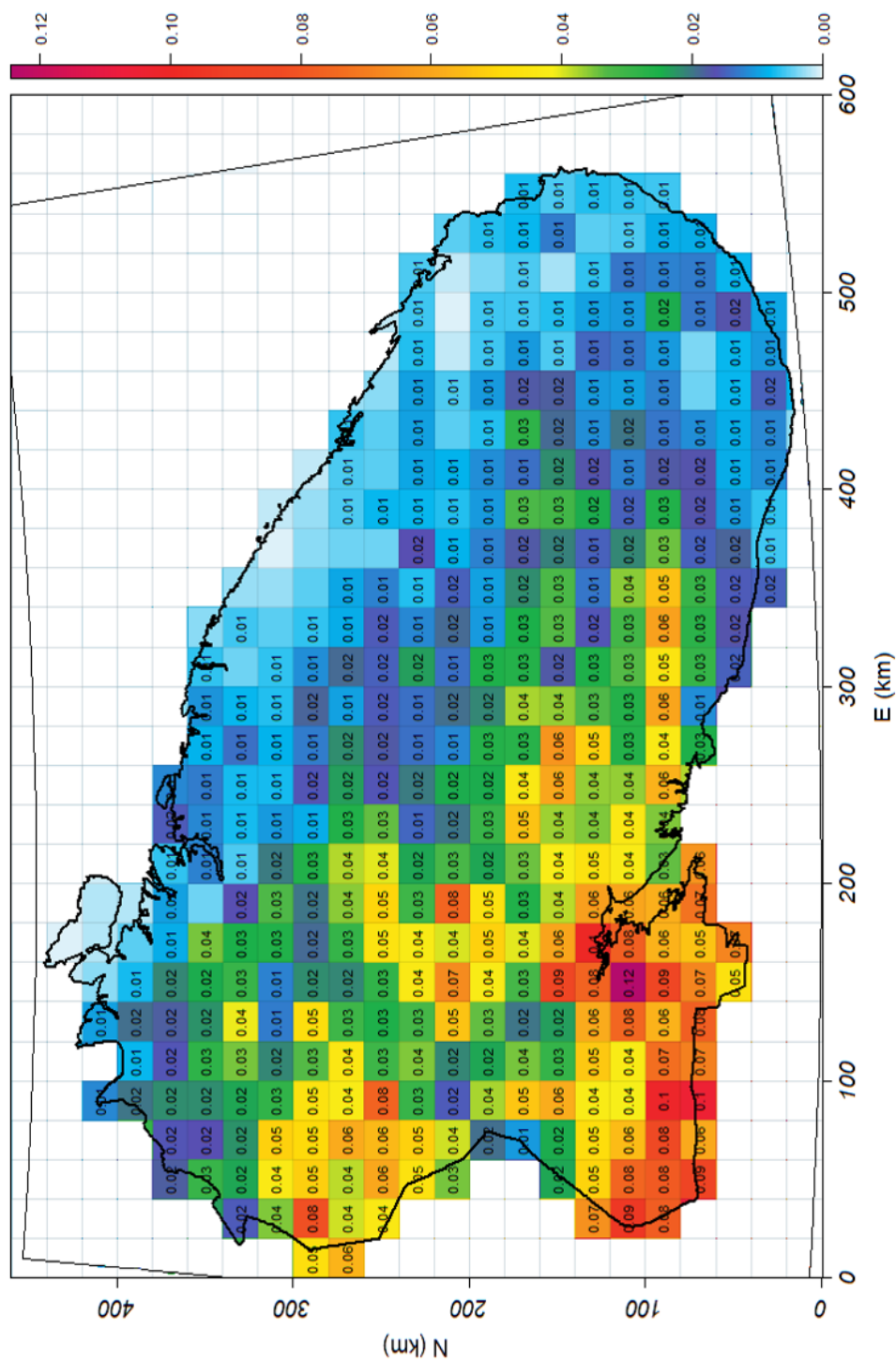


Рис. 3. Среднегодовое число грозных разрядов на 1 кв. км земной поверхности за период 2017–2021 гг.
Fig. 3. The average annual lightning ground flash density for 2017–2021

На рисунке 3 показаны результаты расчета среднегодовой плотности грозовых разрядов — усредненное за пять лет число разрядов в 1 кв. км земной поверхности. Эта величина также показана для квадратных областей размером 20×20 км. В отличие от предыдущей характеристики, значение плотности разрядов напрямую зависит от эффективности системы грозопеленгации. Сам факт наличия грозовых разрядов фиксируется достаточно надежно, что позволяет идентифицировать данный день как день с грозой. В то же время, число зарегистрированных грозовых разрядов зависит от общей чувствительности грозопеленгационной сети, которая определяется количеством датчиков, запеленговавших конкретный разряд на данной территории, а также настройками программного обеспечения сети. Таким образом, следует ожидать, что представленные на рис. 3 значения удельной плотности грозовых разрядов в несколько раз преуменьшены, но общая картина распределения плотности вряд ли сильно отличается от реальной.

Оценка воздействий молний на объекты Кольской энергосистемы

На рисунке 4 отображены результаты регистрации грозовых разрядов на территории Мурманской области системой Blitzortung в грозовой сезон 2021 г. Максимальная грозовая активность наблюдалась в июле, причем в течение одного дня — 6 июля — было зарегистрировано 452 разряда. На рис. 4 показаны также подстанции и ВЛ 35–330 кВ Кольской энергосистемы. По информации, полученной от служб линий энергетических предприятий Мурманской области, в 2021 г. «грозовые» отключения произошли 65 раз, а в 2020 г. — 34 раза, то есть почти в два раза меньше, что подтверждает статистику по молниевой активности, полученную от сети Blitzortung.

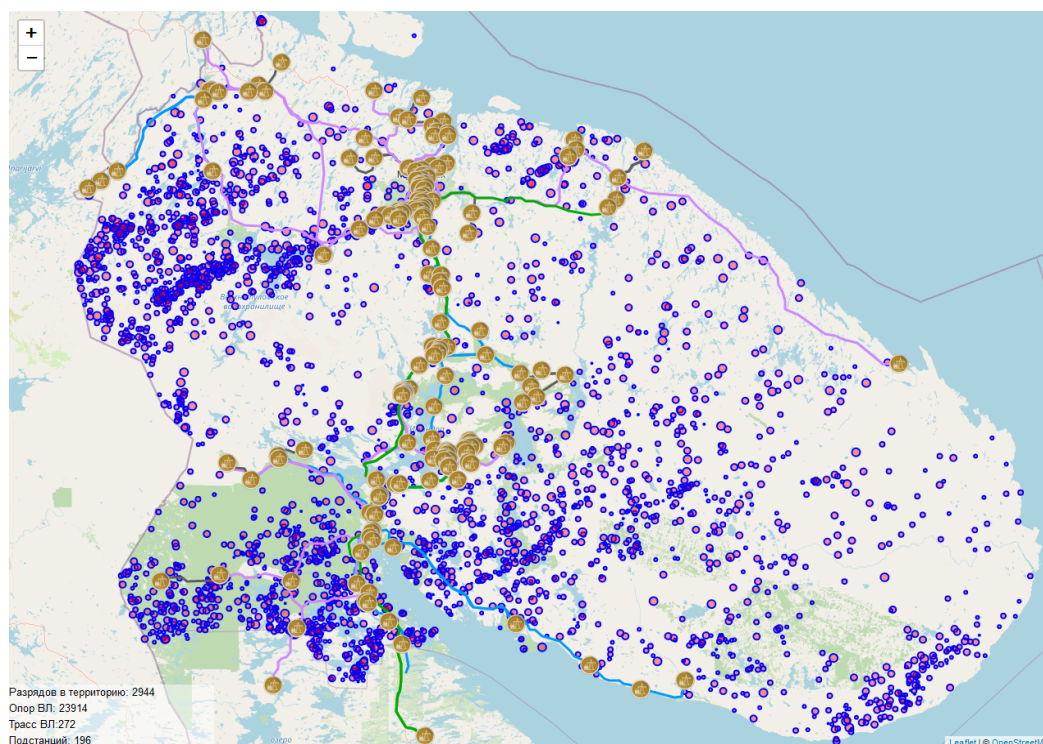


Рис. 4. Молниевые разряды в Мурманской области в 2021 г.
Fig. 4. Lightning discharges in the Murmansk region in 2021

За грозовой сезон 2021 г. с помощью полученной из сети Blitzortung информации были обнаружены несколько мест повреждений на линиях электропередачи Кольской энергосистемы. Обнаружение мест удара молнии в объект электроэнергетики (ВЛ или подстанцию), расположенный в радиусе грозового разряда, выполняется системой автоматического предупреждения, которая содержит электронную базу данных ВЛ и электрических подстанций Мурманской области с максимально подробным описанием их компонентов и пополняемый в реальном времени архив данных по разрядам молний

в регионе. Созданная система анализирует информацию о каждом грозовом разряде, поступающем в базу данных, и в реальном времени ведет поиск координат опор ВЛ и подстанций, попавших в зону действия грозового разряда. В случае обнаружения таких опор, система информирует о вероятном повреждении с указанием диспетчерского наименования объекта, номера опоры ВЛ, координат происшествия и времени события.

Зоной действия грозового разряда считается окружность, имеющая радиус погрешности определения координат разряда. Из-за физических ограничений используемого системой Blitzortung метода определения координат разряда (TOA — Time of Arrival), погрешность составляет в среднем порядка 1400 м. Эта погрешность вычисляется для каждого удара молнии «облако — земля», поэтому можно определить координаты объектов электрической сети, попавшие в зону действия грозового разряда.

На рисунке 5 показан пример, когда в зону действия грозового разряда попало большое количество опор линий электропередачи и подстанций. С наибольшей вероятностью молния ударила в центр окружности, но существует также вероятность, что она поразила любую точку в пределах выделенной зоны радиусом 1724 м, в которую попали 140 опор ВЛ и 4 подстанции 35–150 кВ.

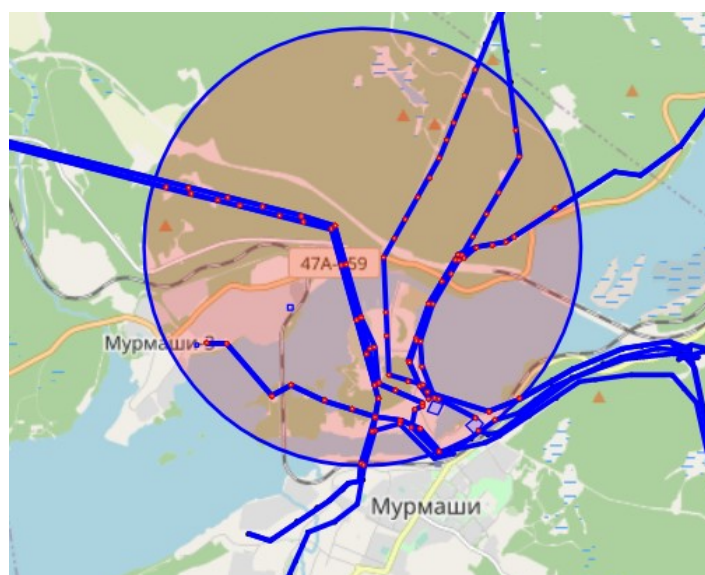


Рис. 5. Зона действия грозового разряда
Fig. 5. Lightning discharge area

В 2021 г. зафиксировано 227 событий, в результате которых в зону действия грозового разряда попали объекты классов напряжений 35–330 кВ, из них в 28 событиях в зону действия попали подстанции. В 60 случаях центр зоны действия находился на расстоянии менее 300 м от подстанции или опоры линии электропередачи.

В таблице 3 представлена оценка молниевой активности на территории Мурманской области с 2012 по 2021 гг. по результатам анализа двух источников данных: данные грозопеленгационной сети Blitzortung и данные по грозовым отключениям ВЛ классов напряжения 35, 110 и 150 кВ.

Таблица 3

Молниевая активность в Мурманской области в 2012–2021 гг.
 Lightning activity in the Murmansk region in 2012–2021

Источник	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Blitzortung	260	1063	2009	417	8045	2555	7476	4287	1440	2944
Грозовые отключения	9	31	129	25	94	29	120	76	34	65

Данные сети Blitzortung вполне адекватно отражают характер изменения молниевой активности по годам. Особенно это заметно для данных последних пяти лет, когда зона уверенного покрытия сетью достигла Кольского полуострова.

Список источников

1. Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М. Анализ результатов регистраций грозовой активности на Кольском полуострове в 2013–2014 гг. // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 6 (32). С. 34–40.
2. Бурцев А. В., Ярошевич В. В., Фастий Г. П., Карпов А. С. Анализ результатов регистрации грозовой активности на Кольском полуострове за 2014–2016 годы // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8, № 8–15. С. 50–56.
3. Селиванов В. Н., Бурцев А. В., Колобов В. В. Анализ молниевой активности на Кольском полуострове в 2019–2020 гг. // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11, № 7 (19). С. 40–52.
4. Boltek. Lightning Detection Systems. URL: <https://www.boltek.com> (дата обращения: 15.08.2022).
5. Аксенович Т. В., Бурцев А. В., Селиванов В. Н. Анализ молниевой активности по результатам мониторинга тока в нейтрали автотрансформатора // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып. 16. 2018. № 3. С. 53–63.
6. Egon Wanke, Richo Andersen, Tobias Volgnandt. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network, 2016. URL: <http://www.blitzortung.org> (дата обращения: 15.08.2022).
7. Burtsev A. V., Selivanov V. N. Method for calculating of lightning impact level on overhead transmission line // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11, № 14.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619255. Программа расчета промежуточных географических координат и построения продольного профиля протяженного объекта с заданным шагом / А. В. Бурцев, В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. № 2020618400; заявл. 27.07.2020; опублик. 13.08.2020. Бюл. № 8. 1 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619102. Программа нахождения объекта, попавшего в зону действия грозового разряда, и оповещения пользователя о данном событии / А. В. Бурцев, В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. № 2020618392; заявл. 27.07.2020; опублик. 11.08.2020. Бюл. № 8. 1 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2021618127. Программа оценки интенсивности воздействия грозовых разрядов на протяженные объекты / Бурцев А. В., Селиванов В. Н.; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. № 2021618127; заявл. 04.05.2021; опублик. 24.05.2021. Бюл. № 6. 1 с.
11. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) / Главгосэнергонадзор России. 7-е изд. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. 610 с.

References

1. Burcev A. V., Nevretdinov Ju. M. Analiz rezul'tatov registracij grozovoj aktivnosti na Kol'skom poluostrove v 2013–2014 gg. [Analysis of the results of thunderstorm activity registration on the Kola Peninsula in 2013–2014]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, no. 6 (32), pp. 34–40. (In Russ.).
2. Burcev A. V., Jaroshevich V. V., Fastij G. P., Karpov A. S. Analiz rezul'tatov registracii grozovoj aktivnosti na Kol'skom poluostrove za 2014–2016 gody [Analysis of the results of thunderstorm activity registration on the Kola Peninsula for 2014–2016]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, vol. 8, no. 8–15, pp. 50–56. (In Russ.).
3. Selivanov V. N., Burcev A. V., Kolobov V. V. Analiz molnievoj aktivnosti na Kol'skom poluostrove v 2019–2020 gg. [Analysis of lightning activity on the Kola Peninsula in 2019–2020]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, vol. 11, no. 7 (19), pp. 40–52. (In Russ.).
4. Boltek. Lightning Detection Systems. Available at: <https://www.boltek.com> (accessed 15.08.2022).

5. Aksenovich T. V., Burcev A. V., Selivanov V. N. Analiz molnievoj aktivnosti po rezul'tatam monitoringa toka v nejtrali avtotransformatora [Analysis of lightning activity based on the results of monitoring the current in the neutral of the autotransformer]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 53–63. (In Russ.).
6. Egon Wanke, Richo Andersen, Tobias Volgnandt: World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network, 2016. Available at: <http://www.blitzortung.org> (accessed 15.08.2022).
7. Burtsev A. V., Selivanov V. N. Method for calculating of lightning impact level on overhead transmission line. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2021, vol. 11, no. 14.
8. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM no. 2020619255 [Certificate of state registration of a computer program no. 2020619255]. Programma rascheta promezhutochnyh geograficheskikh koordinat i postroenija prodol'nogo profilja protjazhennogo objekta s zadannym shagom [Program for calculating intermediate geographical coordinates and constructing a longitudinal preset profile of extended object]. A. V. Burcev, V. N. Selivanov; zajavitel' i pravoobladatel' FIC KNC RAN. No. 2020618400; zajavl. 27.07.2020; opubl. 13.08.2020. Bulletin no. 8, 1 p. (In Russ.).
9. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM no. 2020619102 [Certificate of state registration of a computer program no. 2020619102]. Programma nahozhdenija objekta, popavshego v zonu dejstvija grozovogo razrjada, i opoveshhenija pol'zovatelja o dannom sobytii [Program for detecting lightning discharge zone object and user warning]. A. V. Burcev, V. N. Selivanov; zajavitel' i pravoobladatel' FIC KNC RAN. No. 2020618392; zajavl. 27.07.2020; opubl. 11.08.2020. Bulletin no. 8, 1 p. (In Russ.).
10. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM RU2021618127 [Certificate of state registration of a computer program RU2021618127]. Programma ocenki intensivnosti vozdejstvija grozovyh razrjadov na protjazhennye objekty [Program for assessing the intensity of the impact of lightning discharges on extended objects]. Burcev A. V., Selivanov V. N.; zajavitel' i pravoobladatel' FIC KNC RAN. No. 2021618127; zajavl. 04.05.2021; opubl. 24.05.2021. Bulletin no. 6, 1 p. (In Russ.).
11. Pravila ustrojstva jelektroustanovok (PUJe) [Rules for electrical installations]. Moscow, pbl. ZAO “Jenergосervis”, 2007, 610 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. Н. Селиванов — кандидат технических наук, директор;
А. В. Бурцев — научный сотрудник;
В. В. Ивонин — научный сотрудник;
В. В. Колобов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

V. N. Selivanov — PhD (Engineering), Director;
A. V. Burtsev — Researcher;
V. V. Ivonin — Researcher;
V. V. Kolobov — PhD (Engineering), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 08.10.2022.
The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 08.10.2022.

Научная статья
УДК 621.311.001.57
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.007

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ПРОГРАММНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Елизавета Игоревна Губская

Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия, e.gubskaya@ksc.ru

Аннотация

Надежность и стабильность работы электроэнергетических систем зависят от соблюдения электромагнитной совместимости электрооборудования, что требует обязательного и объективного контроля. Анализ качества электроэнергии в электрических сетях является непростой задачей, поэтому целесообразно проводить его с помощью специализированных программных средств. Приведен краткий обзор среды программирования LabVIEW и программного комплекса MatLab. Рассмотрены возможности применения данных продуктов для решения задач электромагнитной совместимости.

Ключевые слова:

электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, моделирование электроэнергетических систем, LabVIEW, MatLab

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Губская Е. И. Решение задач электромагнитной совместимости специализированными программными средствами // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 68–78. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.007

Original article

SOLVING THE PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY BY USING SPECIALIZED SOFTWARE

Elizaveta I. Gubskaya

Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, e.gubskaya@ksc.ru

Abstract

Reliability and stability of electric power systems depend on compliance with electromagnetic compatibility of electrical equipment, which requires compulsory and objective monitoring. Performing an analysis of power quality in electrical networks is a challenging task, so it is advisable to do it using specialized software. This article gives a brief overview of LabVIEW programming environment and MatLab software package. The possibilities of application of these products for solving the problems of electromagnetic compatibility are considered.

Keywords:

electromagnetic compatibility, power quality, modelling of electric power systems, LabVIEW, MatLab

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Gubskaya E. I. Solving the problems of electromagnetic compatibility by using specialized software // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 68–78. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.007

Введение

Оборудование систем электроснабжения функционирует в условиях генерации, распространения и компенсации электромагнитных помех, которые оказывают негативное воздействие на потребителей электроэнергии. При этом любое из устройств, гальванически связанных друг с другом, может являться источником нежелательных помех и в то же время подвергается воздействию помех, которые

генерируют другие устройства. В связи с этим возникает необходимость обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС), под которой понимается способность технических средств функционировать в нормальном режиме при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех, не создавая при этом недопустимых помех для других технических средств, функционирующих в этой же электромагнитной обстановке [1].

Для обеспечения ЭМС электрооборудования необходимой и обязательной задачей является проведение анализа качества электроэнергии. В большинстве случаев упоминание термина «измерение качества электроэнергии» — необходимое условие для функционирования любой электроэнергетической системы [2, 3]. Однако, несмотря на то что в Российской Федерации качество электроэнергии было теоретически и нормативно описано в [2], требования ГОСТа до сегодняшнего дня выполняются лишь директивно, и очень часто задачи по обеспечению ЭМС в высоковольтной сети не достигаются. Если в сетях 110 кВ и более обеспечение ЭМС очень последовательно, так как система сбалансирована и схема ее относительно стабильна, то в сетях 6–35 кВ (и тем более 0,4 кВ) происходят постоянные изменения подключенных потребителей и характеристика их нагрузки может быть очень разнообразной даже в рамках одного квартала. Согласно действующему в Российской Федерации ГОСТу [4], измерение качества электроэнергии в сети должно производиться в пунктах контроля непрерывно в течение не менее одной недели с использованием средств измерений, имеющих свидетельство (сертификат) об утверждении типа и свидетельство о поверке.

Понятие качества электроэнергии заключается в степени соответствия совокупности определенных параметров, характеризующих электрическую энергию (напряжение, номинальное значение частоты, форма кривой напряжения и др.), установленным стандартам [2–6]. Отклонение этих параметров от нормированных значений обуславливается широким распространением нелинейных электрических нагрузок (двигатели, трансформаторы, приводы переменного и постоянного тока, электродуговые печи и пр.) и приводит к снижению качества электроэнергии в сетях. Негативное влияние таких искажений выражается в снижении эффективности работы и сокращении срока службы различных электроприемников, увеличении потерь электроэнергии, повреждении чувствительного электронного оборудования, ухудшении качества производимых товаров и т. д. Так, например, на одной из подстанций Волго-Донского предприятия магистральных электрических сетей произошло отключение трансформатора в результате виткового замыкания в первичной обмотке. Причиной этому стало ускоренное старение изоляции вследствие многолетней несимметрии токов [7]. Другим примером является систематический сбой в работе прокатных станов турецкого металлургического завода ЗАО “ММК Metalurji” в результате возникновения частых однофазных провалов напряжения в его питающей сети. Поскольку электроприводы прокатных станов выполнены на базе чувствительных к несимметричным провалам преобразователей частоты с активными выпрямителями, это приводит к аварийным отключениям оборудования и, как следствие, к нарушению технологического процесса, что сопровождается значительным экономическим ущербом [8]. В Центре физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук также проводились работы по выявлению причин искажения качества электроэнергии в сети и установлению их влияния на потребителей. При регистрации в сети 6 кВ на подстанции 150/110/35/6 кВ было выявлено, что высоковольтные установки одного из горнодобывающих предприятий Мурманской области негативно влияли на электрические сети города, который подключен к тем же шинам подстанции, что и предприятие [9]. Искажения напряжения и тока в сети привело к массовым поломкам бытовых приборов у жителей города.

При рассмотрении задачи ЭМС высоковольтной сети и, как следствие, стабильности работы электроэнергетической сети в качестве приоритетной для любой отрасли, минимально необходимые регистрации показателей качества электроэнергии (ПКЭ) согласно ГОСТу являются недостаточными. Для объективного контроля измерение ПКЭ должно выполняться при подключении новых потребителей и при существенном изменении схемы электроснабжения в рамках подстанции, что является крайне непростой задачей для персонала эксплуатации сетей. Анализ режимов работы таких сложных многопараметрических систем, как электрические сети, путем проведения реального

эксперимента является трудоемкой и достаточно дорогостоящей задачей. Значительные преимущества для подобных исследований обеспечивает замена реального объекта его цифровым двойником, что позволяет получить представление о поведении системы в условиях вариации различных ее параметров. Таким образом, изучение проблем качества электроэнергии, разработку и проверку методов по его повышению целесообразно проводить с помощью современных программных средств.

Для моделирования процессов в электроэнергетике применяются следующие типы программ: 1) программы для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических полей методом конечных элементов (ANSYS, ELCUT, Femlab, FEMM, FlexPDE и др.); 2) специализированные математические комплексы для научных и инженерно-технических расчетов (Mathcad, MatLab, Maple, MuPAD, GNU Octave, Scilab, Maxima и др.), в том числе программы для моделирования процессов в электрических цепях и сетях (NI Multisim, Simulink, EMTP-RV, ATP-EMTP, MicroTran, RTDS Simulator, PSCAD-EMTDC и др.) [10].

В моделировании методом конечных элементов лежит принцип дискретизации, то есть разбиения модели исследуемого объекта на n -е количество конечных элементов. Это позволяет уйти от решения сложных дифференциальных уравнений, описывающих объект, и перейти к системе линейных алгебраических уравнений, что значительно упрощает расчеты [11]. С другой стороны, такой подход снижает точность получаемых результатов, поскольку она зависит от степени дискретизации модели и формы элемента. В программах второй группы используется сложный математический аппарат, который позволяет математически описать исследуемый объект с высокой точностью [12]. Однако для создания рабочей модели необходимо составить громоздкие системы уравнений, что затрудняет моделирование сложных объектов и процессов.

Таким образом, программные комплексы конечно-элементного моделирования используются для создания моделей объектов сложной конфигурации (например, переменных электромагнитных полей, движущихся потоков жидкостей и т. д.), которые невозможно описать без упрощений, влияющих на точность результатов. Электрическая сеть, напротив, представляет собой объект, функционирование которого возможно интерпретировать посредством математических уравнений с учётом всех свойств данной системы практически в полной мере. Поэтому для получения максимально достоверных результатов при моделировании электроэнергетических систем целесообразно применять специализированные математические комплексы.

Среди программ второй группы отдельно следует выделить среду программирования LabVIEW и пакет программ MatLab, которые на сегодняшний день получили широкое распространение и являются одними из наиболее удобных средств моделирования систем электроснабжения.

Возможности применения LabVIEW

Среда разработки LabVIEW является продуктом компании National Instruments (США) и была впервые выпущена в 1986 г. LabVIEW широко используется в разных отраслях науки и промышленности для проведения измерений, сбора, анализа и представления полученных данных, а также для разработки цифровых двойников технических объектов или технологических процессов, что обеспечивает более эффективное управление производством.

Программы, выполняемые в среде LabVIEW, представляют собой виртуальный прибор (ВП), в состав которого входят блочная диаграмма, описывающая логику работы ВП, и лицевая панель со средствами ввода-вывода (переключателями, кнопками, шкалами, светодиодами и т. д.), которые служат для управления данным ВП (рис. 1).

Виртуальные приборы могут соединяться в качестве составляющих компонентов для построения других ВП. Кроме того, в LabVIEW возможно создавать подпрограммы или виртуальные подприборы (рис. 2). Такая функция позволяет создать более сложную программу на основе простых или предложенных разработчиком блоков, которая может быть использована в составе конечного ВП. Это значительным образом облегчает и сокращает процесс разработки многосоставной программы.

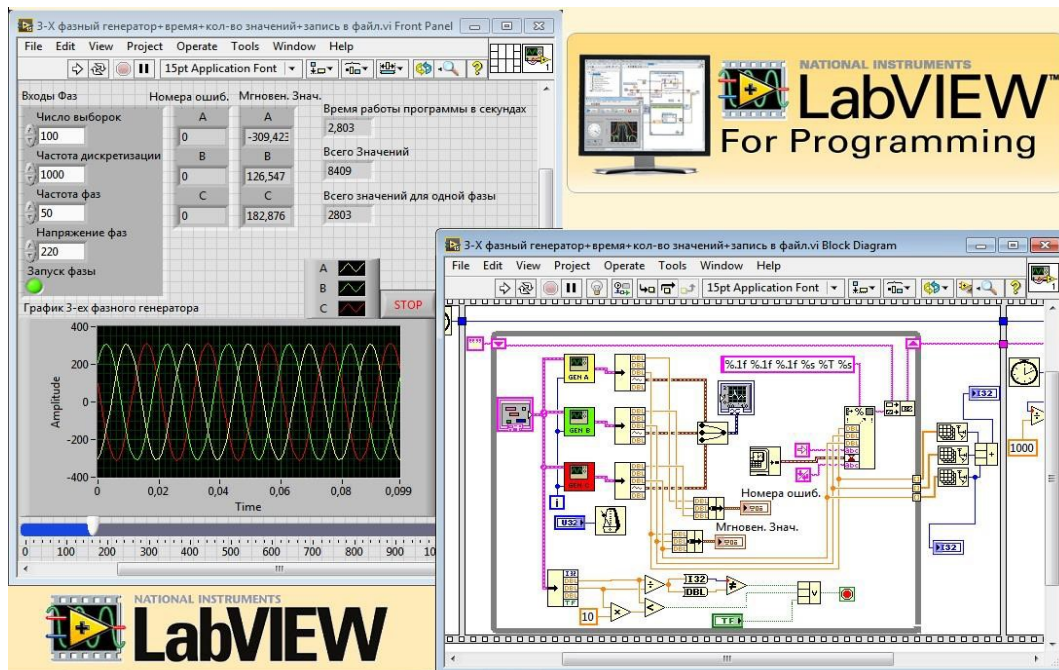


Рис. 1. Пример ВП LabVIEW [13]
 Fig. 1. Example of a LabVIEW virtual instrument (VI) [13]

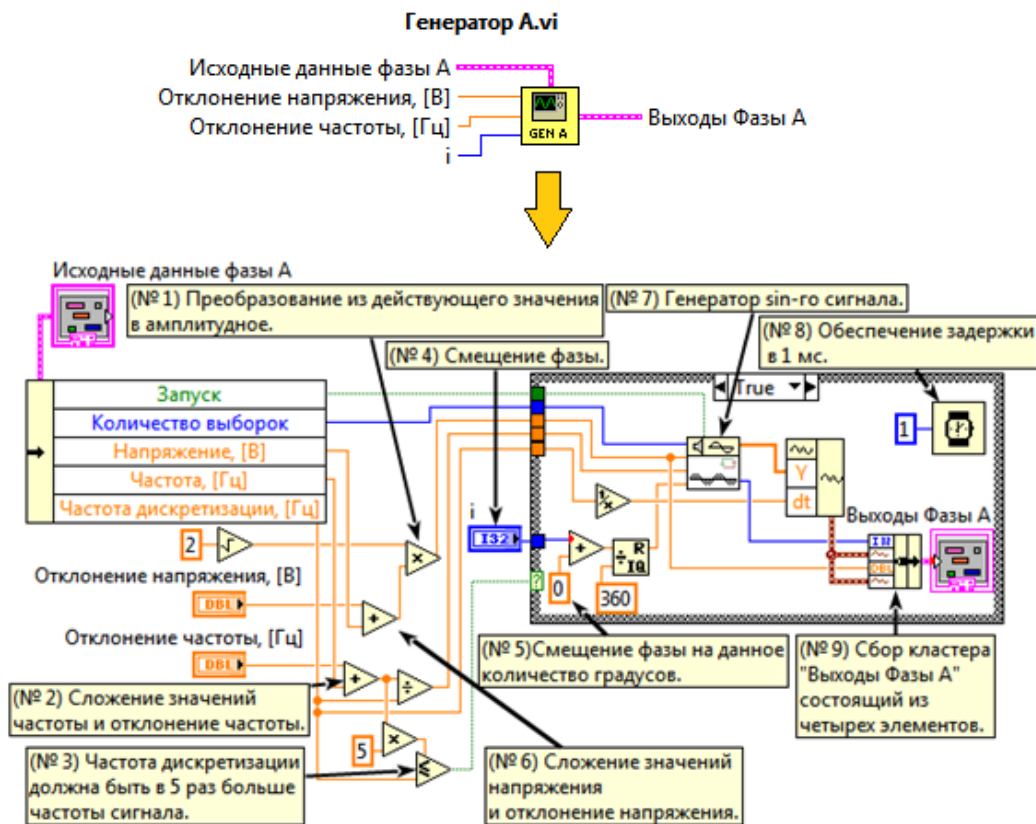


Рис. 2. Пример блок-схемы виртуального подприбора «Генератор А», входящего в состав следующего ВП [13]
 Fig. 2. Example of the block diagram of LabVIEW SubVI “Generator A” which is included in the next VI [13]

Для решения задач ЭМС использование среды программирования LabVIEW представляет интерес, во-первых, с точки зрения моделирования участка действующей сети. Пример применения такого подхода для оценки воздействия нового потребителя на исследуемую электрическую сеть при подключении его к действующей трансформаторной подстанции приведен в работе [13]. Конечный ВП был построен на основе созданных виртуальных подприборов и частично с помощью готовых программ от LabVIEW. Выбор гибридного пути при разработке модели подстанции дает пользователю возможность регулировать значения определенных параметров, таких как частота дискретизации, напряжение, гармонические составляющие, ток потребления и другие, в зависимости от объекта проводимого исследования. Значения ряда исходных данных требуется задавать до запуска программы, а настраиваемые параметры рассматриваемых потребителей (например, значение тока) можно изменять, не прерывая работу ВП. Результатом моделирования являются отображаемые на фронтальной панели трехфазные осциллограммы напряжения и тока, а также их мгновенные значения. С помощью реализованной модели подстанции можно спрогнозировать искажения, которые будут привнесены новым потребителем до его присоединения к сети, и проанализировать влияние новых и подключенных ранее потребителей друг на друга.

Таким образом, за счет отсутствия в данной среде программирования эталонных элементов создаваемые ВП адекватно регулируются различными параметрами и поэтому отличаются гибкостью, так как пользователь имеет возможность задавать любые характеристики элементов исследуемой электрической сети.

LabVIEW может также применяться и для создания программной части автоматизированных комплексов на базе ПК для проведения анализа качества электроэнергии. Так, с использованием LabVIEW и устройства сбора данных USB-6009 (технический продукт компании National Instruments) в Московском институте энергобезопасности и энергосбережения был разработан многофункциональный информационно-измерительный комплекс для проведения детального исследования процессов изменения напряжения и тока в однофазных и трехфазных сетях в условиях воздействия различных возмущений. Разработанный комплекс позволяет провести измерение значений действующих напряжений и сил тока, частоты основной гармоники и прочих параметров; разложить сигналы токов и напряжений на гармонические составляющие в виде графиков амплитудного спектра; построить векторные диаграммы; определить коэффициент мощности в исследуемой сети, несимметрию напряжений и т. д. Регистрация параметров осуществляется с заданным интервалом времени. Полученные данные сохраняются в формате электронных счетных таблиц и затем экспортируются в MS Excel для последующей обработки и составления отчета [14]. Функционал такого программного продукта, безусловно, очень информативен и удобен для дальнейшей обработки, однако полностью дублирует работу сертифицированных регистраторов по измерению показателей качества электроэнергии, ряд из которых обладает функцией выгрузки всего массива данных из памяти прибора. Подобные эксперименты требуют перепроверки достоверности произведенных измерений альтернативными источниками информации или теоретическими расчётами.

Возможности применения Matlab

MatLab был разработан основателями компании The MathWorks (США) в конце 1970-х гг. Данный комплекс программ является платформой, предназначенной для автоматизации научных и инженерно-технических расчетов любой сложности, разработки алгоритмов и создания моделей. MatLab широко используется для решения задач линейной алгебры, интегральных и дифференциальных уравнений, выполнения преобразований Лапласа и Фурье, проектирования систем управления и т. д. Графические возможности пакета позволяют строить двух- и трёхмерные графики в различных системах координат [15].

Для решения задач по моделированию энергетических и электротехнических систем используется среда программирования Simulink с приложением SimPowerSystems (рис. 3). Данный пакет моделирования включает в себя графические блоки, сгруппированные в ряд библиотек в соответствии с их функциями: источники и приемники сигналов различного вида, измерительные и контрольные устройства, электрические машины постоянного и переменного тока и т. д. При необходимости можно создавать собственные блоки. Выбранные компоненты переносятся в основное окно программы с помощью мыши и соединяются между собой необходимыми связями, тем самым формируя цифровую модель исследуемой системы. Полученные данные отображаются графически в окне виртуального измерительного прибора (осциллографа и т. д.).

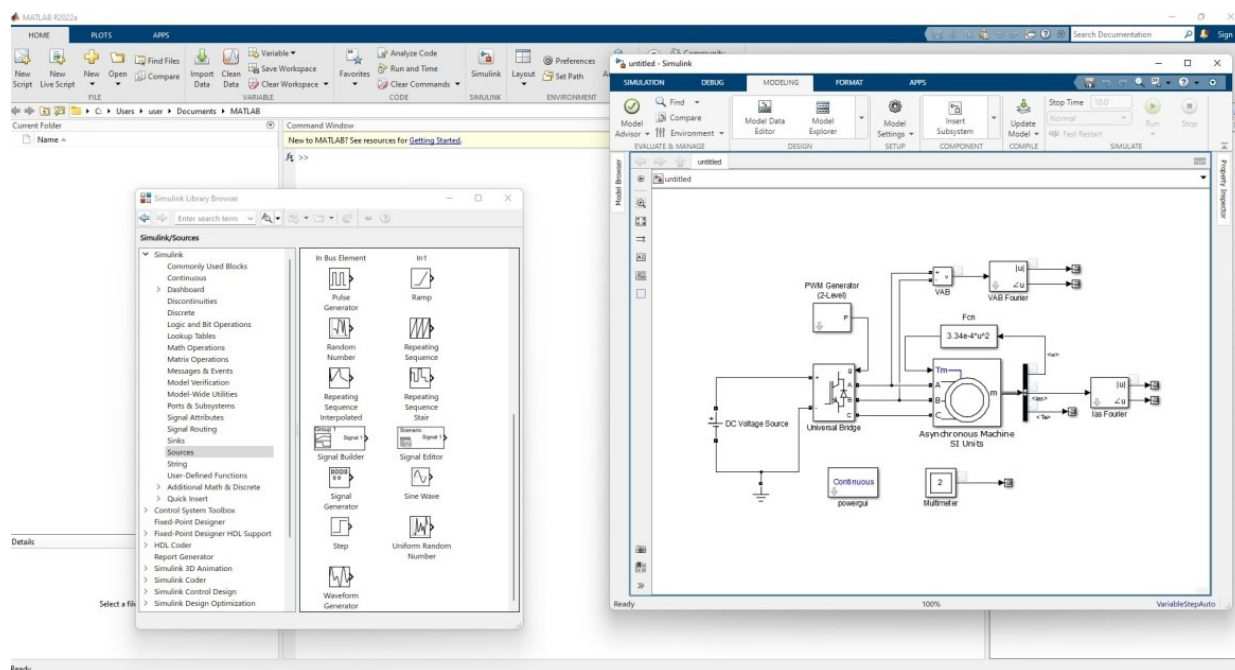


Рис. 3. Интерфейс MatLab/Simulink
Fig. 3. The MatLab/Simulink interface

Функции Simulink и SimPowerSystems позволяют собрать с помощью специальных блоков единую модель, которая имитирует режимы работы реальной системы во временной области, и выполнять различные виды анализа исследуемой системы, в том числе измерение показателей качества электроэнергии [16–19].

Например, в работе [16] приведена и детально описана модель системы электроснабжения вентиляторной станции главного проветривания рудника, построенная в среде Simulink/SimPowerSystems с целью оценить эффективность использования синхронного двигателя вентилятора в качестве компенсатора реактивной мощности. При номинальных значениях исходных данных (тока, напряжения, активной и реактивной мощности и др.) предложенная модель имитирует номинальный режим работы рассматриваемой системы, а при внесении необходимых изменений в параметры блока вентилятора — работу в режиме компенсации реактивной мощности. Результаты моделирования были получены в виде графиков зависимости полной, активной и реактивной мощностей от времени для каждого режима. На основе этих данных был сделан вывод о том, что работа синхронного двигателя в режиме компенсатора реактивной мощности достаточно эффективно способствует ее снижению в исследуемой системе электроснабжения.

Следует отметить, что наличие модулей визуализации позволяет использовать MatLab в качестве эффективного инструмента не только при выполнении исследовательских проектов, но и в сфере высшего образования, поскольку наглядное изображение исследуемого процесса на экране помогает студентам технических специальностей достичь более глубокого понимания изучаемого материала [20, 21].

Подводя итог приведенному выше краткому обзору функций LabVIEW и MatLab, можно выделить следующие преимущества и недостатки каждого средства моделирования с точки зрения их применения в высоковольтной электроэнергетике.

Достоинство LabVIEW заключается в интеграции с реальным оборудованием National Instruments и оборудованием сторонних производителей. Удобный графический интерфейс позволяет легко и быстро подключать различные измерительные устройства и приборы, согласовать их работу, организовать подготовку отчетов и т. д., что помогает пользователю сфокусироваться на поставленной перед ним задаче, не тратя время на разработку программного обеспечения. Что касается работы с виртуальными приборами, LabVIEW является очень гибкой средой программирования, поскольку за счет функции создания подпрограмм с ее помощью можно реализовать большое количество различных моделей, ориентированных

на решение конкретных поставленных задач. Тем не менее, из-за широкого охвата различных отраслей эта платформа лишена некоторых узконаправленных возможностей. Значительный минус работы с LabVIEW связан со скоростью симуляции модели, которая не может превышать скорость обработки используемого ПК. Это затрудняет моделирование процессов, носящих кратковременный характер, что свойственно таким явлениям, как импульсы и провалы напряжения, перенапряжения и т. д. Для того чтобы модель отображала подобные процессы, требуется вносить необходимые изменения в ее структуру и работу, так как во время симуляции исходные значения, заданные до запуска программы, не могут быть изменены. Такой способ решения проблемы существенно утяжеляет модель в сравнении с MatLab, где система построения моделей основывается на использовании заготовленных устройств с варьируемыми параметрами, физика которых прописана внутри самой программы.

Основным преимуществом MatLab является подход к моделированию энергетических и электротехнических систем, который сочетает методы структурного (с использованием блоков Simulink, отражающих алгоритм работы исследуемого объекта, а не его электрическую схему) и имитационного (с помощью имитационных блоков SimPowerSystems) моделирования. Это позволяет значительным образом упростить модель и, следовательно, повысить ее работоспособность. Кроме того, в среде MatLab/Simulink пользователь может объединять компоненты модели в подсистемы, избегая нагромождений вторичных блоков и отображая тем самым общую структуру рассматриваемой системы. С другой стороны, создание сложных моделей сопряжено с построением громоздких многоуровневых блок-схем, которые не отражают реальную структуру моделируемых систем. Важно подчеркнуть и существенный недостаток, общий для обоих программных продуктов, — высокая стоимость лицензии.

Таким образом, среда LabVIEW наиболее удобна для применения в качестве программного обеспечения, чтобы обеспечить полностью работоспособную систему сбора данных в реальном времени, так как с помощью LabVIEW возможно проводить измерения с одновременной визуализацией и обработкой полученных данных. Для моделирования систем электроснабжения целесообразно использовать Simulink, расширение MatLab, поскольку концепция создания моделей, подобно сборке конструктора, более удобна и позволяет достаточно быстро и с высокой точностью строить модели объектов любой сложности.

Кроме того, LabVIEW и MatLab в равной степени эффективно используются для симуляции и визуализации различных явлений, в том числе электрофизических процессов, лежащих в основе искажений качества электроэнергии в электрических сетях [22–26] и поэтому отлично подходят для изучения особенностей работы систем электроснабжения в специализированных образовательных учреждениях.

Заключение

Вследствие широкого распространения нелинейных электрических нагрузок вопросы ЭМС играют решающую роль в обеспечении надежного функционирования электроэнергетических систем. Соблюдение ЭМС высоковольтных установок предупреждает возникновение серьезных нарушений в работе электрооборудования, которые могут привести к критическим повреждениям устройств и даже авариям. В связи с этим исключительно большое значение имеет контроль ЭМС в электрических сетях.

Существует два варианта контроля ЭМС: контроль ПКЭ строго в соответствии с нормами действующего ГОСТа (что крайне важно для электроснабжающих организаций) и оперативный контроль с целью сохранения требуемой электромагнитной обстановки при изменениях в сети, который подразумевает регистрацию ПКЭ по правилам, установленным ГОСТом, с последующей аналитикой данных. При этом второй вариант более перспективен для промышленных предприятий из-за активного использования установок, обладающих нелинейной нагрузкой.

Оперативный контроль можно проводить не только с помощью сертифицированных регистраторов, но и с использованием специальных программных средств, таких как LabVIEW и MatLab, причем целесообразность применения каждого продукта зависит от поставленных перед исследователем задач. Среда разработки LabVIEW подходит для работы с приборной техникой и симуляции различных процессов, в то время как пакет моделирования MatLab имеет практически неограниченные возможности для создания достоверных моделей, имитирующих работу реальных электроэнергетических систем.

Список источников

1. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. Введ. 2012–09–01. М.: Стандартинформ, 2013. 62 с.
2. Межгосударственный стандарт ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 1999–01–01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 35 с.
3. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–01–07. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
4. Межгосударственный стандарт ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2015–01–01. М.: Стандартинформ, 2015. 46 с.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 60 с.
6. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2013. 40 с.
7. Коверникова Л. И., Серков А. В., Шамонов Р. Г. Об управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем // Региональная энергетика: безопасность и эффективность. 2018. № 1. С. 75–85.
8. Николаев А. А., Ивекеев С. В., Ложкин И. А. Анализ провалов напряжения в районных электрических сетях 380 кВ провинций Хатай и Адана Турецкой Республики // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2018. Т. 16, № 1. С. 61–70.
9. Анализ результатов мониторинговой регистрации показателей качества электроэнергии / Ю. М. Невретдинов, Г. П. Фастий, В. В. Ярошевич, А. С. Карпов // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 1. С. 67–76.
10. Селиванов В. Н. Использование программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 1. С. 107–112.
11. Пайшанбиев С. А., Калинин Э. В. Основные преимущества и недостатки метода конечных элементов при решении задач инженерной геодинамики // Материалы второй Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М., 2018. С. 199–205.
12. Мысовских В. И. Системы компьютерной алгебры и символьные вычисления // Записки научных семинаров ПОМИ. 2001. Т. 281. С. 227–236.
13. Шиханов И. С., Карпов А. С., Ярошевич В. В. Возможность использования многоплатформенной среды LabVIEW для решения задач высоковольтной электроэнергетики // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2016. № 12. С. 20–28.
14. Белов Н., Черемухин В., Жматов Д. Информационно-измерительный комплекс для анализа параметров качества электроэнергии с применением технологий National Instruments // Control Eng. Россия. 2013. Т. 48, № 6. С. 90–95.
15. Колкер А. Б., Ливенец Д. А., Кошелева А. И. Обоснование выбора программного обеспечения для робототехники // Автоматика и программная инженерия. 2012. № 1 (1). С. 51–64.
16. Семенова М. Н., Заголило С. А. Моделирование системы электроснабжения главной вентиляторной установки рудника при компенсации реактивной мощности // Международный студенческий вестник. 2018. № 3. С. 1318–1324.
17. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling // Energy. Elsevier Ltd. 2016. Vol. 115. P. 830–839.
18. Бочкарева И. И. Обеспечение электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода вентиляторов установок охлаждения газа с источниками электроснабжения // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. С. 1–8.

19. Wu J., Cao B., Lin W. Simulation analysis of harmonic characteristics of photovoltaic power generation system based on MATLAB // *Energy Procedia*. Elsevier B. V. 2019. Vol. 158. P. 412–417.
20. Егорова А. А., Семенов А. С., Петрова М. Н. Применение программ математического моделирования при изучении дисциплин естественнонаучного и профессионального циклов у технических специальностей // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2 (2). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22723> (дата обращения: 24.08.2022).
21. Норкулова О. З., Аликулова Х. Б. Использование программы Simulink пакета Matlab в учебно-образовательном процессе // *International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education*. Boston, 2019. P. 20–21.
22. Hussein A. S., Hawas M. N. Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink // *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2019. Vol. 16, № 3. P. 1144–1153.
23. Bath S. K., Kumra S. Simulation and measurement of power waveform distortions using LabVIEW // *Proceedings of the 2008 IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference, PMHVC*. Las Vegas, 2008. P. 427–434.
24. Pietkiewicz A. Virtual laboratory for harmonics filtering visualization // *SPEEDAM 2008 — International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. Ischia, 2008. P. 508–512.
25. MATLAB/Simulink based modeling and simulation of power quality disturbances / S. Khokhar, A. A. Mohd Zin, A. S. Mokhtar, N. A. M Ismail // *2014 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2014*. Johor Bahru, 2014. № 03. P. 445–450.
26. Dhote P. V., Deshmukh B. T., Kushare B. E. Generation of power quality disturbances using MATLAB-Simulink // *3th IEEE Sponsored International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, ICCPEIC 2015*. Tamil Nadu, 2015. P. 301–305.

References

1. Nacional'nyj standart RF GOST R 50397-2011. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Terminy i opredelenija [Electromagnetic compatibility of technical means. Terms and definitions]. Vved. 01.09.2012. Moscow, Standartinform, 2013, 62 p. (In Russ.).
2. Mezghosudarstvennyj standart GOST 13109-97. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. Vved. 01.01.1999. Moscow, IPK Izd-vo standartov, 1999, 35 p. (In Russ.).
3. Mezghosudarstvennyj standart GOST 32144-2013. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. Vved. 01.07.2014. Moscow, Standartinform, 2014, 20 p. (In Russ.).
4. Mezghosudarstvennyj standart GOST 33073-2014. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Kontrol' i monitoring kachestva jelektricheskoi jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Control and monitoring of the quality of electrical energy in general purpose power supply systems]. Vved. 01.01.2015. Moscow, Standartinform, 2015, 46 p. (In Russ.).
5. Mezghosudarstvennyj standart GOST 30804.4.30-2013. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Metody izmerenij pokazatelej kachestva jelektricheskoi jenerгии [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measuring the quality of electrical energy]. Vved. 01.01.2014. Moscow, Standartinform, 2014, 60 p. (In Russ.).
6. Mezghosudarstvennyj standart GOST 30804.4.7-2013. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Obshhee rukovodstvo po sredstvam izmerenij i izmerenijam garmonik i intergarmonik dlja sistem jelektrosnabzhenija i podkljuchaemyh k nim tehnikeskikh sredstv. [Electromagnetic compatibility of technical means. General guidance on measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and technical means connected to them]. Vved. 01.01.2014. Moscow, Standartinform, 2013, 40 p. (In Russ.).

7. Kovernikova L. I., Serkov A. V., Shamonov R. G. Ob upravlenii kachestvom jelektricheskoy jenerгии v Rossii v proshlom, nastojashhem i budushhem [About electric energy quality management in Russia in the past, present and future]. *Regional'naja jenergetika bezopasnost' i jeffektivnost'* [Regional Energy Security and Efficiency], 2018, no. 1, pp. 75–85. (In Russ.).
8. Nikolaev A. A., Ivekeev S. V., Lozhkin I. A. Analiz provalov naprjazhenija v rajonnyh jelektricheskikh setjah 380 kV provincij Hataj i Adana Tureckoj Respubliki [Analysis of voltage failures in the 380 kV district electric networks of Hatay and Adana provinces of the Republic of Turkey]. *Vestnik MGTU im. G. I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov], 2018, vol. 16, no. 1, pp. 61–70. (In Russ.).
9. Nevretdinov Ju. M., Fastij G. P., Jaroshevich V. V., Karpov A. S. Analiz rezul'tatov monitoringovoj registracii pokazatelej kachestva jelektrojenerгии [Analysis of the results of monitoring registration of electricity quality indicators]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of the Murmansk State Technical University], 2014, vol. 17, no. 1, pp. 67–76. (In Russ.).
10. Selivanov V. N. Ispol'zovanie programmy rascheta jelektromagnitnyh perehodnyh processov ATP-EMTP v uchebnom processe [Using the ATP-EMTP electromagnetic transient calculation program in the educational process]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of the Murmansk State Technical University], 2009, vol. 12, no. 1, pp. 107–112. (In Russ.).
11. Pajshanbiev S. A., Kalinin Je. V. Osnovnye preimushhestva i nedostatki metoda konechnykh jelementov pri reshenii zadach inzhenernoj geodinamiki [The main advantages and disadvantages of the finite element method in solving problems of engineering geodynamics]. *Materialy vtoroj Obshherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh specialistov "Inzhenernye izyskanija v stroitel'stve"* [Proceedings of the second All-Russian scientific and practical conference of young specialists "Engineering surveys in construction"]. Moscow, 2018, pp. 199–205. (In Russ.).
12. Mysovskih V. I. Sistemy komp'yuternoj algebry i simvol'nye vychislenija [Computer algebra systems and symbolic calculations]. *Zapiski nauchnyh seminarov POMI* [Notes of Scientific Seminars of StPDMI], 2001, vol. 281, pp. 227–236. (In Russ.).
13. Shihanov I. S., Karpov A. S., Jaroshevich V. V. Vozmozhnost' ispol'zovanija mnogoplatformennoj sredy LabVIEW dlja reshenija zadach vysokovol'tnoj jelektrojenergetiki [The possibility of using the LabVIEW multi-platform environment to solve problems of high-voltage electric power industry]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Jenergetika*. [Transactions of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2016, no. 12, pp. 20–28. (In Russ.).
14. Belov N., Cheremuhin V., Zhmatov D. Informacionno-izmeritel'nyj kompleks dlja analiza parametrov kachestva jelektrojenerгии s primeneniem tehnologij National Instruments [Information and measurement complex for the analysis of electricity quality parameters using National Instruments technologies]. *Control Eng. Rossija* [Control Engineering. Russia], 2013, vol. 48, no. 6, pp. 90–95. (In Russ.).
15. Kolker A. B., Livenec D. A., Kosheleva A. I. Obosnovanie vybora programmnogo obespechenija dlja robototehniki [Justification of the choice of software for robotics]. *Avtomatika i programmaja inzhenerija* [Automation and Software Engineering], 2012, no. 1 (1), pp. 51–64. (In Russ.).
16. Semenova M. N., Zagolilo S. A. Modelirovanie sistemy jelektrosnabzhenija glavnoj ventiljatornoj ustanovki rudnika pri kompensacii reaktivnoj moshhnosti [Simulation of the power supply system of the main fan plant of the mine with reactive power compensation]. *Mezhdunarodnyj studencheskij vestnik* [International Student Bulletin], 2018, no. 3, pp. 1318–1324. (In Russ.).
17. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. *Energy, Elsevier Ltd*, 2016, vol. 115, pp. 830–839.
18. Bochkareva I. I. Obespechenie jelektromagnitnoj sovместимости chastotno-reguliruemogo jelektroprivoda ventiljatorov ustanovok ohlazhdenija gaza s istochnikami jelektrosnabzhenija [Ensuring electromagnetic compatibility of the frequency-controlled electric drive of fans of gas cooling units with power supply sources]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija* [Modern Issues of Science and Education], 2012, no. 2, pp. 1–8. (In Russ.).
19. Wu J., Cao B., Lin W. Simulation analysis of harmonic characteristics of photovoltaic power generation system based on MATLAB. *Energy Procedia, Elsevier B. V.*, 2019, vol. 158, pp. 412–417.

20. Egorova A. A., Semenov A. S., Petrova M. N. Primenenie programm matematicheskogo modelirovanija pri izuchenii disciplin estestvennonauchnogo i professional'nogo ciklov u tehniceskikh special'nostej [Application of mathematical modeling programs in the study of disciplines of natural science and professional cycles in technical specialties]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija* [Modern Issues of Science and Education], 2015, no. 2 (2). (In Russ.). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22723> (accessed 24.08.2022).
21. Norkulova O. Z., Alikulova H. B. Ispol'zovanie programmy Simulink paketa Matlab v uchebno-obrazovatel'nom processe [Using the Simulink program of the Matlab package in the educational process]. *International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education*, Boston, 2019, pp. 20–21. (In Russ.).
22. Hussein A. S., Hawas M. N. Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 1144–1153.
23. Bath S. K., Kumra S. Simulation and measurement of power waveform distortions using LabVIEW. *Proceedings of the 2008 IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference, PMHVC*. Las Vegas, 2008, pp. 427–434.
24. Pietkiewicz A. Virtual laboratory for harmonics filtering visualization. *SPEEDAM 2008 – International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, 2008, pp. 508–512.
25. Khokhar S., Mohd Zin A. A., Mokhtar A. S., Ismail N. A. M. MATLAB/Simulink based modeling and simulation of power quality disturbances. *2014 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2014*, Johor Bahru, 2014, no. 03, pp. 445–450.
26. Dhote P. V., Deshmukh B. T., Kushare B.E. Generation of power quality disturbances using MATLAB-Simulink. *3th IEEE Sponsored International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, ICCPEIC 2015*, Tamil Nadu, 2015, pp. 301–305.

Информация об авторе

Е. И. Губская — инженер.

Information about the author

E. I. Gubskaya — Engineer.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 08.10.2022.
The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 08.10.2022.

Научная статья
УДК 622; 621.3
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.008

РАЗРУШЕНИЕ ТВЁРДЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ОТХОДОВ ИМПУЛЬСАМИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Василий Николаевич Селиванов¹, Андрей Александрович Климов²

^{1, 2}*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия*

¹*v.selivanov@ksc.ru*

²*a.klimov@ksc.ru*

Аннотация

В настоящее время большая часть твёрдых техногенных отходов перерабатывается с применением комплексов механического дробления для выделения ценного сырья. Однако переработка высокопрочных композиционных отходов, в частности абразивных изделий и конструкций из армированного волокном бетона, с помощью механического дробления зачастую сопровождается повышенным износом измельчающих агрегатов, загрязнением регенерированного продукта и снижением его потребительских качеств. Показано, что использование высоковольтных разрядов для разрушения твёрдых непроводящих отходов позволяет с незначительными энергозатратами разделять их компоненты и получать пригодное для возвращения в производственные процессы сырьё.

Ключевые слова:

электроимпульсная дезинтеграция (ЭИД), техногенные отходы, абразивные изделия, электрокорунд, высокопрочный бетон, энергоёмкость разрушения

Благодарности:

работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90233, а также в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Селиванов В. Н., Климов А. А. Разрушение твёрдых композиционных отходов импульсами высокого напряжения // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 79–86. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.008

Original article

FRACTURING OF SOLID COMPOSITE WASTE WITH HIGH VOLTAGE PULSES

Vasilii N. Selivanov¹, Andrey A. Klimov²

^{1, 2}*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

¹*v.selivanov@ksc.ru*

²*a.klimov@ksc.ru*

Abstract

Resently most of the solid technogenic waste is recycled using mechanical crushing complexes to separate valuable raw materials. However, the recycling of high-strength waste, in particular, abrasive products and structures made of fiber-reinforced concrete, with mechanical crushing is often accompanied by increased wear of crushing units, contamination of the recovered product and a decrease in its consumer qualities. This article shows that the use of high voltage pulses for destruction of solid non-conductive waste allows to separate their components with insignificant energy costs and obtain a suitable raw material for returning to production processes.

Keywords:

electric pulse disintegration (EPD), technogenic waste, abrasive products, fused alumina, high performance concrete, specific breakage energy

Acknowledgments:

the work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-38-90233 and within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Selivanov V. N., Klimov A. A. Fracturing of solid composite waste with high voltage pulses // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 79–86. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.008

Введение

Множество законодательных актов и нормативных документов Российской Федерации направлено на развитие программ по созданию экологически чистых и энергетически эффективных промышленных производств. Одним из основных направлений таких программ является переработка скапливающихся отходов промышленности и возврат пригодного для повторного применения сырья в производственный цикл. По различным оценкам [1], более 90 % от массы всех образующихся отходов промышленности составляют отходы производства (техногенные отходы).

Одними из наиболее перспективных в плане полноты переработки и лёгкости вторичного использования можно считать отходы бетонных и железобетонных (ЖБИ) изделий и неликвиды абразивных изделий на твёрдой основе. Абразивная промышленность России, по данным РАПТЭ за 2013 г. [2], способна выпускать более 122 млн единиц абразивных кругов, 10 % из которых составляют изделия на твёрдой основе. Основными потребителями абразивного инструмента являются железнодорожная, судо- и автомобилестроительная промышленность, предприятия тяжёлого и энергетического машиностроения, деревообрабатывающая промышленность. Абразивные инструменты, не прошедшие проверку качества после изготовления, повреждённые в ходе эксплуатации или использованные до утраты потребительских свойств, складываются на специальных полигонах или применяются в подсобном строительстве. Отходы бетонных и ЖБИ-производств и строительный мусор от сноса зданий также утилизируются с помощью хранения на полигонах [3].

По данным Росстата и Мурманскстата, в год на территории Мурманской области в совокупности образуется около 6–7 тыс. т боя и лома бетонных, ЖБИ и абразивных изделий, и только около 12 % из них подвергается переработке [4]. Федеральный классификационный каталог отходов (ФККО) относит лом абразивов и бетона к практически неопасным отходам V класса, поэтому они могут быть почти полностью подвергнуты рециклингу.

Современные технологические линии по переработке абразивных изделий чаще всего включают в себя их механическое сухое крупнокусковое дробление с помощью щёковых дробилок и последующее доизмельчение валковыми дробилками, что всегда связано с определёнными трудностями: высокой энергоёмкостью многостадийного процесса разрушения [5]; высоким износом измельчающего оборудования [6]; загрязнением конечного продукта материалом дробилок и, как следствие, введением в процесс переработки стадии магнитной сепарации; переизмельчением исходного сырья из-за высокой хрупкости абразивных кристаллов; снижением эксплуатационных характеристик продукта.

Аналогичные сложности сопровождают переработку и разделение компонентов новых видов ЖБИ, например блоков высокопрочного бетона, армированного металлическим, стеклянным или синтетическим волокном. Такие конструкции всё в большем количестве применяются в арктических регионах с сильными температурными колебаниями из-за их повышенной прочности, пластичности и морозостойкости. Механическое дробление этих изделий затруднено и всегда сопровождается ухудшением свойств входящих в их состав компонентов.

Также значительным недостатком сухого механического дробления является высокое пылеобразование, поскольку пыль абразивная и пыль бетонная, по ФККО, относятся уже к IV классу опасности и для них устанавливаются определённые технологические требования по улавливанию и обезвреживанию.

Недостатки существующих технологических циклов переработки приведённых твёрдых техногенных отходов обуславливают необходимость поиска эффективных альтернатив для решения проблемы их накопления и утилизации. В последние годы наблюдается повышенный интерес исследователей к использованию электроимпульсных технологий в сфере переработки различных отходов промышленности, которые связаны с применением электрических разрядов с большими энергиями в газовых или жидких средах для измельчения материалов [7–9] естественного и искусственного происхождения.

Метод ЭИД представляет собой способ контролируемого нарушения целостности композиционных материалов с разделением входящих в их состав компонентов. Данный эффект достигается за счёт формирования в толще материала канала разряда с помощью источников коротких импульсов высокого напряжения. Быстрое развитие канала приводит к появлению всесторонних деформаций

растяжения внутри материала и распространению ударных акустических волн, разрушающих объект воздействия изнутри. Поскольку развитие канала происходит по границам различных фаз, при разрушении наблюдается высвобождение разнородных включений, находящихся в структуре дробимого материала. ЭИД осуществляется в диэлектрических жидкостях, поскольку их импульсная прочность намного превышает прочность твёрдых веществ.

Исследование ЭИД изделий из абразивных материалов, бетона и ЖБИ

В Центре физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (ЦЭС КНЦ РАН) были проведены экспериментальные исследования по ЭИД отходов абразивных изделий на твёрдой основе. Такие изделия представляют собой композицию, в которой зерна абразива жестко закреплены материалом стеклообразного связующего вещества. Структура композиции включает три различные фазы: кристаллы абразива, связку и воздушные включения (рис. 1). Данные фазы равномерно распределены по всему объёму абразивного изделия. В промышленности основная масса шлифовальных изделий на твёрдой основе изготавливается из зернового электрокорунда, который является диэлектрическим материалом.

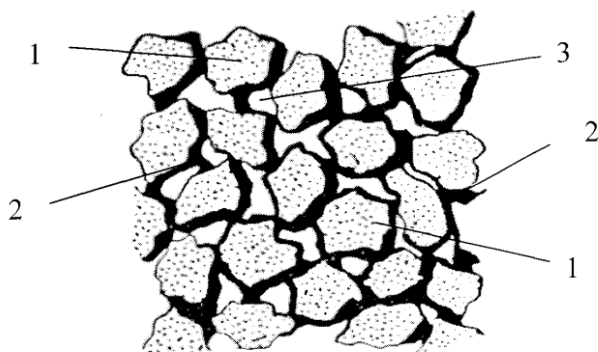


Рис. 1. Пример структуры абразивных изделий на керамической основе:

1 — зёрна абразивного материала; 2 — связка; 3 — поры

Fig. 1. Example of the structure of vitrified bonded abrasive products:

1 — grains of abrasive material; 2 — bond; 3 — pores

Для подтверждения применимости ЭИД при переработке абразивов было исследовано дробление образцов, представляющих собой бой-лом колец из белого, нормального и хромотитанистого электрокорундов с керамическим связующим (рис. 2). Представленные виды электрокорунда отличались по своему химическому составу и по чистоте использованного для изготовления кристаллов сырья. Все образцы содержали в себе абразивные кристаллы с показателем зернистости F40/46 по стандарту FEPAF, то есть размер фракции исходных кристаллов электрокорунда находился в диапазоне 600–300 мкм, а основная фракция зёрен, то есть не менее 40 % массы фракции, имела размер от 425 до 355 мкм. Линейные размеры образцов колебались в довольно широких диапазонах: высота колец — от 50 до 150 мм, толщина — от 60 до 160 мм.

Для воздействия на образцы был применён семиступенчатый генератор импульсных напряжений (ГИН) с запасаемой в накопителях энергией 1,4 кДж, создававший импульсы с длительностью фронта порядка 250 нс и амплитудой напряжения в 320 кВ.

Эксперименты по дроблению проводились в специальной измельчительной камере с изоляционной конструкцией и электродной системой, близкой к конфигурации «остриё — чаша». Устройство камеры изображено на рис. 3. В процессе дезинтеграции фрагментированный материал проходил через перфорированный электрод-классификатор, определявший крупность получаемого продукта. Абразивные изделия подвергались последовательному дроблению на четырех ситах с размерами отверстий от 15 до 1 мм с выделением необходимых фракций на каждой стадии. Таким образом, исследуемый материал доводился до крупности менее 1 мм, поскольку данная фракция с минимальной обработкой может быть использована повторно.



Рис. 2. Образец абразивного кольца из хромотитанистого электрокорунда
Fig. 2. Sample of a vitrified grinding wheel made of pink fused alumina with titanium dioxide

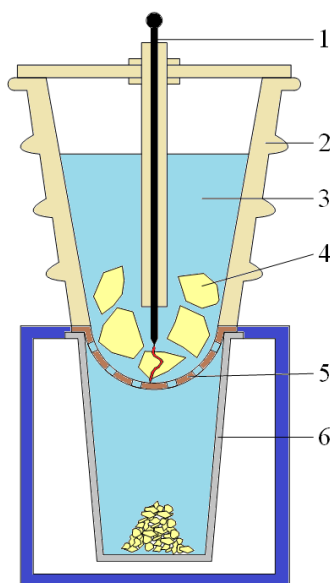


Рис. 3. Устройство измельчительной камеры:

1 — высоковольтный электрод; 2 — изоляционный корпус камеры; 3 — вода; 4 — лом абразивных изделий;
5 — сито-классификатор; 6 — емкость для продукта дробления

Fig. 3. Design of the crushing chamber:

1 — high-voltage electrode; 2 — insulating body of the chamber; 3 — water; 4 — abrasive scrap; 5 — sieve electrode;
6 — container for fractured product

Данные по фракционным составам продуктов дезинтеграции показали, что уже при уменьшении крупности образцов до 15 мм выход фракции менее 1 мм составляет 30–40 % по массе, что подтверждает высокую селективность электроимпульсного метода при измельчении твёрдых диэлектрических материалов с резко неоднородной структурой (таблица). Фракционные распределения продуктов измельчения размером менее 1 мм свидетельствуют о том, что после прохождения последнего сита-классификатора около 80 % массы зёрен, высвобожденных из связующего состава, соответствует по размерам кристаллическому материалу, использованному для изготовления изделий (рис. 4). Для сравнения: в техпроцессе механической переработки неликвидов абразивов с помощью щёковой дробилки на Волжском абразивном заводе (ВАЗ) более 60 % фракции подвергается переизмельчению, при этом до 25 % фракции уходит в размер менее 200 мкм, которая не используется ВАЗ как зерновой материал для абразивных изделий и применяется для производства огнеупоров. Энергоёмкость разрушения абразивов составила 7–15 кВт · ч / т в зависимости от стадии измельчения.

Выход продуктов измельчения в класс менее 1 мм для разных стадий ЭИД
 и энергозатраты на измельчение на данной стадии
 Fractured product yield of less than 1 mm size class for different stages of the EPD
 and specific breakage energy at each stage

Конечная крупность измельчения, мм	15	5	2	1
Содержание фракции менее 1 мм, %	32÷42	47÷50	78÷85	100
Средняя энергоёмкость измельчения, кВт · ч / т	7,2	7,6	11,0	15,0

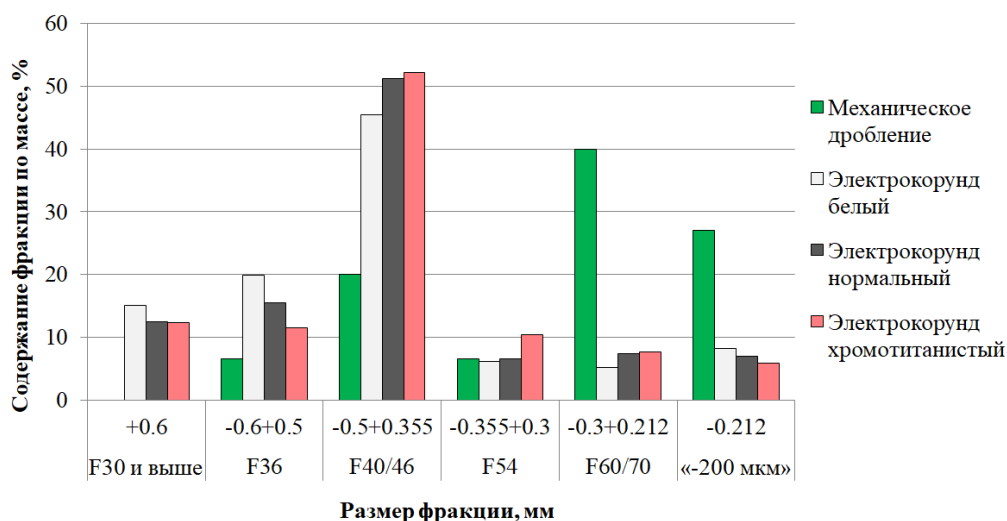


Рис. 4. Усреднённое фракционное распределение продуктов ЭИД абразивов размером менее 1 мм
Fig. 4. Average grain size distribution of EPD abrasive products in less than 1 mm size class

Проверка полученных зерновых материалов из трех видов электрокорунда специалистами ВАЗ показала, что метод ЭИД высвобождает кристаллы абразива из керамической матрицы в практически нетронутым состоянии, прочностные характеристики регенерированного зерна не уступают таковым у нового, а его себестоимость значительно ниже. Полученный продукт может быть использован в повторном изготовлении абразивных изделий или в операциях гидроабразивной резки и абразивоструйной очистки на предприятиях, имеющих литейное, сварочное или механообрабатывающее производство с применением абразивных изделий в технологических процессах.

Схожую с абразивами структуру имеют изделия из бетона и железобетона, в которых в цементную матрицу с воздушными полостями включены фрагменты заполнителя из горных пород и искусственных материалов. Исследования по электроимпульсному измельчению кускового бетона и железобетона проводились ранее в Томском политехническом университете. В отношении разрушения некондиционного ЖБИ имеются сведения [10] об опытных образцах установок с применением перемещаемой одноэлектродной системы, в которых достигалась производительность разрушения плит в $1,2 \text{ м}^3 / \text{ч}$ при удельных энергозатратах в $2 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$. Исследователи из Технологического института Карлсруэ (Германия) сообщали о создании прототипа полупромышленной установки FRANKA-Stein для селективного разрушения бетона с производительностью $1 \text{ т} / \text{ч}$ и практически полным выделением гравийного заполнителя и армирующих материалов [11]. Наиболее актуальными являются данные исследовательской группы из французской компании BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), которой при измельчении блоков сверхвысокопрочного бетона с металлическим волокном (UHPFRC) с помощью установки SELFRAGAG удалось достичь 60 %-го уровня извлечения очищенных металлических волокон из массы блоков при уровне энергозатрат в $13,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$ [12]. Также ими было отмечено, что на процесс фрагментации существенным образом не влияет прочность бетона на сжатие, что говорит о широкой применимости метода ЭИД для разрушения различных отходов бетона и ЖБИ.

Проведённые в ЦЭС КНЦ РАН эксперименты подтвердили возможность электроимпульсного разрушения лома ЖБИ с полным высвобождением стальной арматуры при уровне энергозатрат порядка $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$ для изделий с гравийным заполнителем крупностью 0,5–7 см. Пример кускового разрушения представлен на рис. 5.

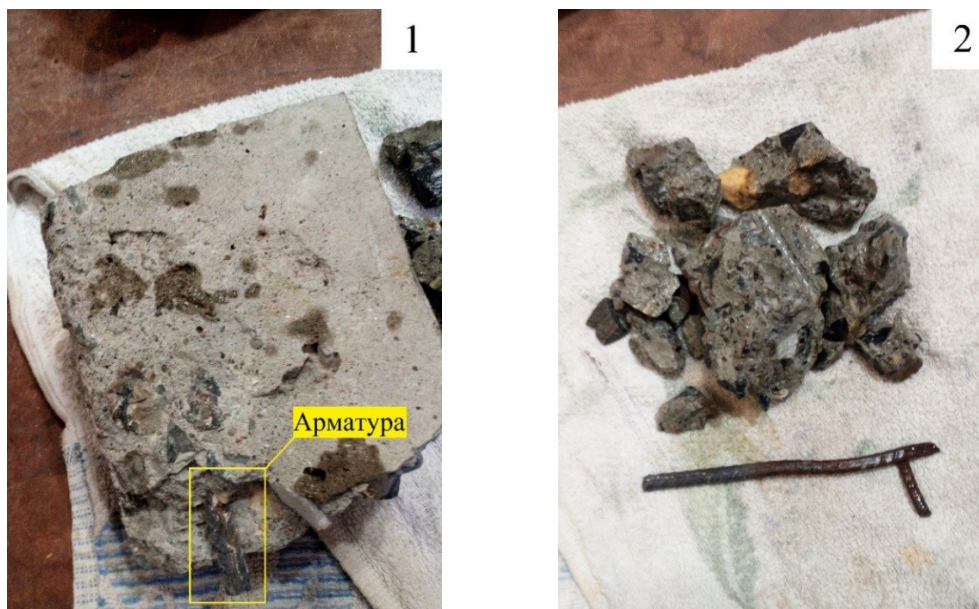


Рис. 5. Высвобождение стальной арматуры из бетона при электроимпульсном воздействии: 1 — образец ЖБИ до ЭИД; 2 — разрушенный образец

Fig. 5. Separation of steel reinforcement from concrete with electric pulse treatment: 1 — reinforced concrete sample before EPD; 2 — fractured sample

Заключение

Для представленных в статье техногенных композиционных отходов можно выделить следующие преимущества ЭИД перед механическим дроблением: 1) высокая селективность дробления неоднородных по составу и структуре материалов, обусловленная физикой процесса электрического пробоя; 2) низкий износ измельчающего оборудования, поскольку основным рабочим телом процесса является электрическая искра, а эрозия поверхности электродной системы минимальна; 3) отсутствие ограничений по твёрдости дробимого материала; 4) отсутствие дополнительного загрязнения продуктов при дроблении особо твёрдых материалов; 5) отсутствие сильного пылеобразования, поскольку измельчение происходит в водной среде (что особенно важно, например, в случае переработки отходов, загрязнённых радиоактивными веществами).

Таким образом, электроимпульсный метод переработки твёрдых техногенных отходов в определённых случаях может являться экологичной альтернативой традиционному механическому дроблению, сочетающей в себе малые энергетические затраты на процесс и высокую эффективность разделения компонентов перерабатываемых материалов.

Список источников

1. Романова С. М., Степанова С. В., Ярошевский А. Б. Процессы, аппараты и оборудование для защиты литосферы от промышленных и бытовых отходов. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. 144 с.
2. Абразивный инструмент: целесообразность и перспективы импортозамещения // Портал «masterforum.ru». М., 2014. URL: <https://master-forum.ru/abrazivnyj-instrument-tselesoobraznost-i-perspektivy-importozameshheniya/> (дата обращения: 18.09.2022).
3. Electrical fragmentation applied to the recycling of concrete waste — Effect on aggregate liberation / S. Touzé, K. Bru, Y. Ménard [et al.] // International Journal of Mineral Processing. 2017. Vol. 158. P. 68–75.

4. Территориальная схема обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами Мурманской области. Приложение 1 (материалы в табличной форме, таблицы 1–8.2, 10–16) // Официальный сайт органов местного самоуправления города Кировска Мурманской области. URL: https://kirovsk.ru/main/oos/territorialnaya_shema_obraweniya_s_tko/ (дата обращения: 18.09.2022).
5. Ревнивцев В. И. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов / В. И. Ревнивцев, Г. А. Денисов, Л. П. Зарогатский, В. Я. Туркин. М.: Недра, 1992. 429 с.
6. Клушанцев Б. В., Косарев А. И., Муйземнек Ю. А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
7. Емелин М. А., Морозов В. Н., Новиков Н. П. Новые методы разрушения горных пород: учеб. пособие для горно-геологических вузов. М.: Недра, 1990. 239 с.
8. Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels — Impact on recycling / S.-M. Nevala, J. Hamuyuni, T. Junnila [et al.] // *Waste Management*. 2019. Vol. 87. P. 43–50.
9. The stripping effect of using high voltage electrical pulses breakage for waste printed circuit boards / C. Duan, J. Han, S. Zhao [et al.] // *Waste Management*. 2018. Vol. 77. P. 603–610.
10. Зиновьев Н. Т. Электроимпульсное разрушение некондиционного железобетона // *Обогащение руд*. 1989. № 4. С. 43–45.
11. FRANKA-Stein: Design, operation and industrial application / P. Hoppe, J. Singer, H. Bluhm [et al.] // *IEEE Conference Record of the 25th Power Modulator Symposium*. 2002. P. 559–562.
12. Investigation of lab and pilot scale electric-pulse fragmentation systems for the recycling of ultra-high performance fibre-reinforced concrete / K. Bru, S. Touzé, P. Auger [et al.] // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 128. P. 187–194.

References

1. Romanova S. M., Stepanova S. V., Jaroshevskij A. B. *Processy, apparaty i oborudovanie dlja zashhity litosfery ot promyshlennyh i bytovyh othodov* [Processes, devices and equipment for protecting the lithosphere from industrial and household waste]. Kazan, KNITU, 2012, 144 p. (In Russ.).
2. *Abrazivnyj instrument: celesoobraznost' i perspektivy importozameshhenija* [Abrasive tools: feasibility and prospects of import substitution]. (In Russ.). Available at: <https://master-forum.ru/abrazivnyj-instrument-tselesoobraznost-i-perspektivy-importozameshheniya/> (accessed 18.09.2022).
3. Touzé S., Bru K., Ménard Y., Weh A., Von der Weid F. Electrical fragmentation applied to the recycling of concrete waste — Effect on aggregate liberation. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, vol. 158, pp. 68–75.
4. *Territorial'naja shema obrashhenija s othodami, v tom chisle s tverdymi kommunal'nymi othodami Murmanskoj oblasti. Prilozhenie 1 (materialy v tablichnoj forme, tablicy 1–8.2, 10–16)* [Territorial scheme of waste management, including solid municipal waste of the Murmansk region]. (In Russ.). Available at: https://kirovsk.ru/main/oos/territorialnaya_shema_obraweniya_s_tko/ (accessed 18.09.2022).
5. Revnivcev V. I., Denisov G. A., Zarogatskij L. P., Turkin V. Ja. *Vibracionnaja dezintegracija tverdyh materialov* [Vibrational disintegration of solid materials]. Moscow, Nedra, 1992, 429 p. (In Russ.).
6. Klushancev B. V., Kosarev A. I., Mujzemnek Ju. A. *Drobilki. Konstrukcija, raschet, osobennosti jekspluatacii* [Crushers. Design, calculation, operation features]. Moscow, Mashinostroenie, 1990, 320 p. (In Russ.).
7. Emelin M. A., Morozov V. N., Novikov N. P. *Novye metody razrushenija gornyh porod: uchebnoe posobie dlja gorno-geologicheskikh vuzov* [New methods of rock destruction: a textbook for mining and geological universities]. Moscow, Nedra, 1990, 239 p. (In Russ.).
8. Nevala S. M., Hamuyuni J., Junnila T., Sirviö T., Eisert S., Wilson B. P., Serna-Guerrero R., Lundström M. Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels — Impact on recycling. *Waste Management*, 2019, vol. 87, pp. 43–50.
9. Duan C., Han J., Zhao S., Gao Z., Qiao J., Yan G. The stripping effect of using high voltage electrical pulses breakage for waste printed circuit boards. *Waste Management*, 2018, vol. 77, pp. 603–610.
10. Zinov'ev N. T. *Jelektroimpul'snoe razrushenie nekondicionnogo zhelezobetona* [Electric pulse destruction of substandard reinforced concrete]. *Obogashhenie rud* [Ore Dressing], 1989, no. 4, pp. 43–45. (In Russ.).

11. Hoppe P., Singer J., Bluhm H., Frey W., Giese H., Massier H., Edinger W., Schweike U. FRANKA-Stein: Design, operation and industrial application. *IEEE Conference Record of the 25th Power Modulator Symposium*, 2002, pp. 559–562.
12. Bru K., Touzé S., Auger P., Dobruský S., Tierrie J., Parvaz D. Investigation of lab and pilot scale electric-pulse fragmentation systems for the recycling of ultra-high performance fibre-reinforced concrete. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 128, pp. 187–194.

Информация об авторах

В. Н. Селиванов — кандидат технических наук, директор;

А. А. Климов — младший научный сотрудник.

Information about the authors

V. N. Selivanov — PhD (Engineering), Director;

A. A. Klimov — Junior Researcher.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 08.10.2022.
The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 08.10.2022.

Научная статья
УДК 621.3
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.009

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДРОБЛЕНИЯ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ. ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ДИНАМИКУ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Александр Сергеевич Зорин

Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия, a.zorin@ksc.ru

Аннотация

Кратко представлены основы электроимпульсной технологии дезинтеграции твёрдых диэлектрических материалов. Рассмотрена схема высоковольтного импульсного генератора и дробильно-измельчительной камеры, интегрированной в экспериментальную установку. Обозначены факторы, оказывающие влияние на разрядные процессы, а также приведены результаты моделирования распределения линий напряжённости электрического поля для соответствующих случаев.

Ключевые слова:

электроимпульсная технология дробления, генератор импульсных напряжений и токов, полости в материале, распределение напряжённости электрического поля

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Зорин А. С. Электроимпульсная технология дробления твёрдых диэлектрических материалов. Факторы, оказывающие влияние на динамику разрядных процессов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 87–96. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.009

Original article

ELECTRO-PULSE TECHNOLOGY OF DESTRUCTION OF SOLID DIELECTRIC MATERIALS. FACTORS INFLUENCING THE DYNAMICS OF DISCHARGE PROCESSES

Aleksandr S. Zorin

Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, a.zorin@ksc.ru

Abstract

The article briefly presents the basics of electro-pulse technology for the disintegration of solid dielectric materials. The scheme of a high-voltage pulse generator and a crushing and grinding chamber integrated into the experimental setup, is considered. The factors influencing the discharge processes are indicated, and the results of modeling the distribution of electric field intensity lines for the corresponding cases are presented.

Keywords:

electro-pulse technology of destruction, generator of pulse voltage and current, cavities in the material, electric field intensity distribution

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Zorin A. S. Electro-pulse technology of destruction of solid dielectric materials. Factors influencing the dynamics of discharge processes // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 87–96. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.009

Введение

В настоящее время альтернативой механическому методу дробления твёрдых диэлектрических материалов является технология электроимпульсного разрушения, которая была предложена еще сто лет назад. Сегодня она совершенствуется на базе специально оборудованных лабораторий и станций.

Ее механизм заключается в воздействии высоковольтного электрического импульса на образец материала, который подлежит дроблению. Подаваемый электроимпульс приводит к непосредственному электрическому пробоему образца и последующему его разрушению на более мелкие фракции. В момент

пробоя в образце возникают разрывающие усилия, которые достаточно эффективно дезинтегрируют материал и связующее в нём вещество. Генерация высоковольтного импульса происходит при помощи специальной сборки конденсаторных батарей, которые образуют единое энергетическое устройство — генератор импульсных напряжений и токов [1].

На экспериментальной площадке Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (ЦЭС КНЦ РАН) проводятся исследования по изучению эффективности рассматриваемой технологии и определяется потенциал её внедрения в технологические процессы производственно-перерабатывающих предприятий. В частности, ряд экспериментов ставится на высоковольтном генераторе импульсных напряжений (ГИН), состоящем из семи емкостных ступеней с суммарной ёмкостью накопителей 1,4 мкФ, которые способны выдавать на рабочий (межэлектродный) промежуток напряжение 315 кВ и энергию в импульсе 1417 Дж [2].

В конфигурацию установки, помимо генератора импульсных напряжений, также входят следующие блок-компоненты: 1) зарядная часть (ЛАТР), защитные устройства и высоковольтный однофазный трансформатор, питающий схему ГИН; 2) коммутационное устройство — отделительный разрядник (ОР), интегрированный в схему ГИН; 3) технологическая ёмкость — дробильно-измельчительная камера (ДИК), в которую помещается применяемая в конкретном эксперименте электродная система и образцы материала; 4) измерительная часть — высоковольтные делители напряжения и токовые шунты для снятия экспериментальных осциллограмм [2].

Дробильно-измельчительная камера представляет собой ёмкость (бак) объёмом около 25 л (объём чашевидного электрода, в котором размещается материал для дробления, составляет около 3,5 л), в которую при помощи специальных крепёжных механизмов установлена система электродов. Весь объём бака заполняется технической водой с удельным сопротивлением около 10 кОм / см. Чаще всего в исследованиях применяется электродная система конфигурации «остриё-полусфера», к существенным преимуществам которой можно отнести следующие факторы: наиболее подходящая для разрядного процесса картина напряжённости поля (высокая неоднородность поля за счёт формы электродов); удобство загрузки, выгрузки и нахождения материала внутри системы в момент опытов за счёт геометрии чашевидного электрода, которая позволяет отлично удерживать образцы внутри камеры и, соответственно, значительно снизить преждевременный выход материала за её пределы (по сравнению с электродом плоской формы). Принципиальный вид ДИК представлен на рис. 1 [3].

Следует отметить, что установка имеет достаточно гибкую настройку параметров выходного напряжения, энергии в импульсе и длины межэлектродного промежутка, но в настоящей статье будет рассматриваться случай с фиксированными параметрами, которые были указаны выше. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2 [4].

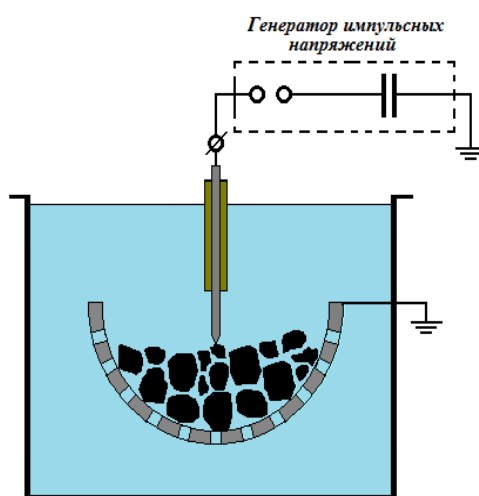


Рис. 1. Дробильно-измельчительная камера, применяемая в исследованиях по дроблению
Fig. 1. Crushing and grinding chamber used in crushing research

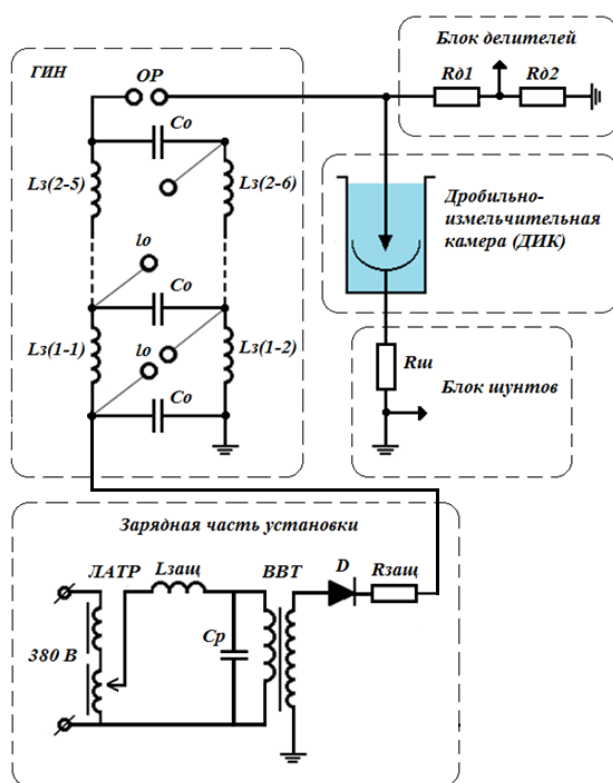


Рис. 2. Схема экспериментальной установки с генератором импульсных напряжений:

ЛАТР — трёхфазный лабораторный автотрансформатор; *L_{зщ}* — защитный дроссель; *ВВТ* — высоковольтный однофазный трансформатор; *C_p* — резонансная ёмкость; *D* — выпрямительный столб; *L₃* — зарядные индуктивности ГИН; *C₀* — емкостные накопители ГИН; *l₀* — длина воздушного промежутка разрядников ГИН, *OP* — отделительный разрядник; *R_{д1}* и *R_{д2}* — делители напряжения; *R_ш* — шунт; *ДИК* — экспериментальная дробильно-измельчительная камера

Fig. 2. Diagram of an experimental installation with a pulse voltage generator:

ЛАТР — three-phase lab autotransformer; *L_{зщ}* — protective throttle; *ВВТ* — high-voltage single-phase transformer; *C_p* — resonant container; *D* — straightening pillar; *L₃* — pulse voltage generator charging inductors; *C₀* — pulse voltage generator capacity accumulators; *l₀* — air gap length of pulse voltage generator arresters, *OP* — separating arrester; *R_{д1}* и *R_{д2}* — voltage dividers; *R_ш* — shunt; *ДИК* — pilot crushing and grinding chamber

Экспериментальная часть

Процесс электроимпульсного дробления сопровождается выделением значительного числа энергии, которая перераспределяется в различных направлениях с течением импульса. Данное перераспределение требует более точной физико-математической оценки с целью повышения эффективности импульсного воздействия на материал и, соответственно, модернизации блок-компонентов экспериментальной установки для дальнейших исследований [5]. Так, к примеру, была предложена идея о том, что на разрядные процессы значительное влияние может оказывать наличие полостей (пустот) и вкраплений в материале, которые могут быть заполнены воздухом или жидкой средой, в которой находится электродная система при проведении экспериментов.

Практически весь материал, применяемый при дроблении, имеет неоднородную внутреннюю структуру. Хаотичное распределение зёрен в толще материала сопровождается наличием пустот (полостей) и вкраплений, которые могут быть как открытого, так и закрытого типов. Пустоты открытого типа заполняются технической водой в момент погружения в межэлектродное пространство экспериментальной установки; пустоты закрытого типа могут быть заполнены газом, образовавшимся в процессе изготовления материала на производстве. Наличие полостей приводит к образованию границы раздела между основным материалом образца и субстанцией, которая содержится в полости,

за счёт различных физических характеристик (удельного сопротивления, удельной проводимости, диэлектрической проницаемости и т. д.). Это приводит к тому, что линии напряжённости поля начинают ориентироваться по границам раздела и по сечению самих полостей, соответственно, изменяя траекторию следования электрического импульса через материал.

Отдельно стоит отметить, что объём материала, погружённого в камеру, может оказывать влияние на разрядные процессы следующим образом: образцы материала, находящиеся вблизи потенциального электрода, влияют на распределение линий напряжённости поля, разнося потенциалы по своей поверхности. Исходя из этого, необходимо рассматривать как минимум три варианта заполняемости ДИК материалом: минимальное, частичное и полное заполнение. В рамках данной статьи результаты моделирования электродной системы с тремя вышеперечисленными вариантами заполняемости камеры материалом представлены не будут.

Как уже было сказано ранее, дробимый материал может иметь достаточно сложную внутреннюю структуру и абсолютно непредсказуемое количество полостей, пустот и вкраплений. Соответственно, для моделирования предложенной задачи необходимо создать экспериментальную модель, которая будет отображать параметры реального эксперимента, проводимого сотрудниками лаборатории [5]. Исходя из этого, была построена модель электродной системы, интегрированной в ДИК экспериментальной установки (рис. 3). Следует обратить внимание на то, что материал в камере на рис. 3 не имеет полостей, пустот и вкраплений, то есть является идеализированным примером.

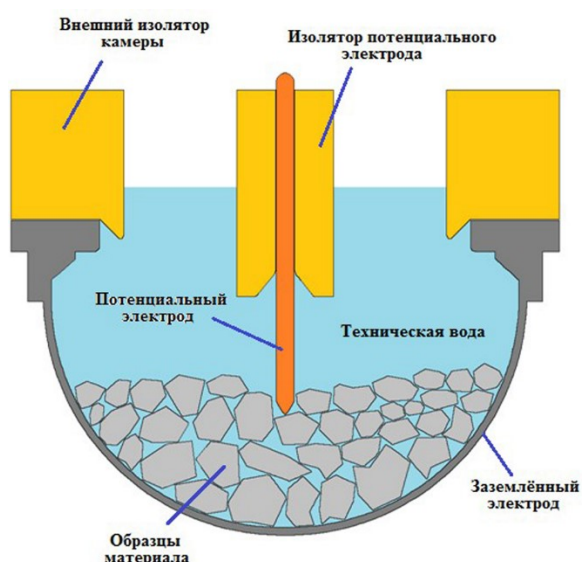


Рис. 3. Принципиальный вид электродной системы, внедрённой в экспериментальную установку (частичное заполнение камеры)

Fig. 3. Basic view of the electrode system introduced in the pilot setup (partial filling of the chamber)

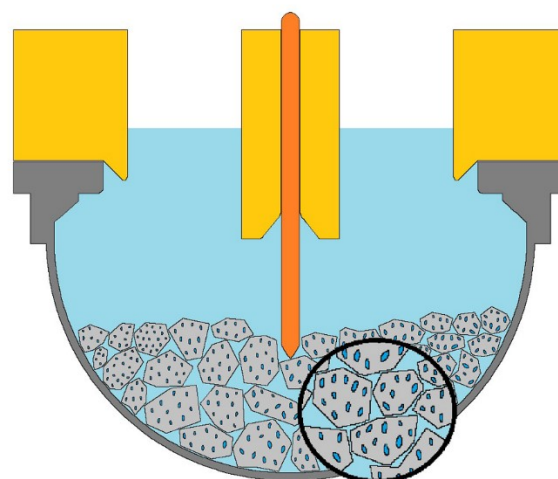


Рис. 4. Образцы материала с водными полостями в объёме

Fig. 4. Samples of material with water cavities in the volume

При помощи специального программного обеспечения FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics) было проведено моделирование распределения линий напряжённости поля в электродной системе конфигурации «остриё-полусфера» при различных объёмах загруженного материала и, соответственно, при наличии и отсутствии полостей в образцах. В программе рассматривалась осесимметричная задача, соответственно, от модели, представленной на рис. 4, использовалась только её правая часть. В качестве исследуемого материала в экспериментах и при моделировании использовался электрокорунд (диэлектрическая проницаемость 7,8). Характеристики сред, которые находятся в полостях и пустотах материала, соответствуют характеристикам технической воды, которой заполняется камера, и воздуха, который был замкнут в полости при производстве материала. Для более удобного сравнения

полученных результатов геометрия образцов материала, механические параметры камеры и электрические параметры установки были сведены к одному общему виду. Так как геометрия реальных образцов абсолютно хаотична, то при моделировании была выбрана единая их форма, и в дальнейшем она не менялась. Длина межэлектродного промежутка была зафиксирована на значении 70 мм. Далее будут представлены результаты моделирования и сделаны соответствующие выводы.

Влияние полостей (пустот) в материале на разрядные процессы

Для начала необходимо определиться с форм-фактором полостей, которые будут находиться в образцах материала при моделировании. Средний диаметр образцов в камере составляет около 19 мм; средний диаметр полостей — 3,5 мм. Количество полостей в материале определяется размерами образца: чем больше образец, тем больше пустот он содержит в своём объёме. На рис. 4 представлен общий вид материала, помещённого в ДИК, содержащего в своём объёме полости, заполненные технической жидкостью.

При наличии в материале пустот, заполненных воздухом, геометрия модели будет сохраняться неизменной, то есть полости, изображённые на рис. 5, будут считаться закрытыми и содержать в себе не жидкость, попавшую в них при погружении в ДИК, а воздух, оставшийся там при изготовлении материала на производстве.

В соответствии с вышеуказанными условиями и параметрами в FEMM 4.2 была построена экспериментальная модель и проведено моделирование распределения линий напряжённости поля, результаты которого представлены на рисунках 5 и 6. Как уже было сказано ранее, построение и моделирование задачи было выполнено в осесимметричном формате, исходя из чего на рисунках 5 и 6 изображена только правая сторона экспериментальной ДИК.

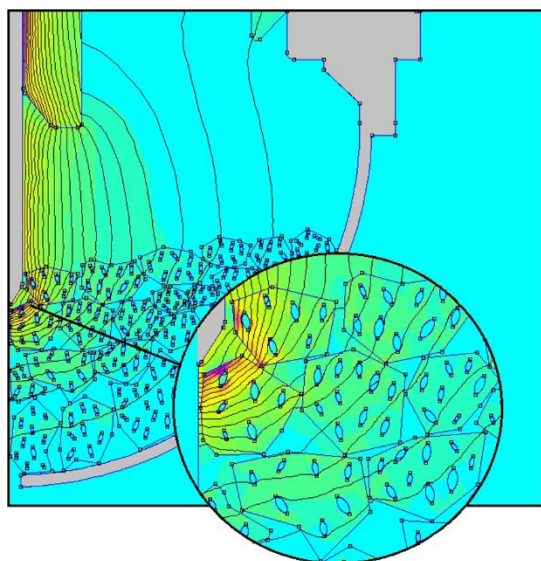


Рис. 5. Распределение напряжённости поля по материалу при наличии в нём полостей, заполненных технической жидкостью

Fig. 5. Distribution of field intensity across the material in the presence of cavities filled with technical fluid

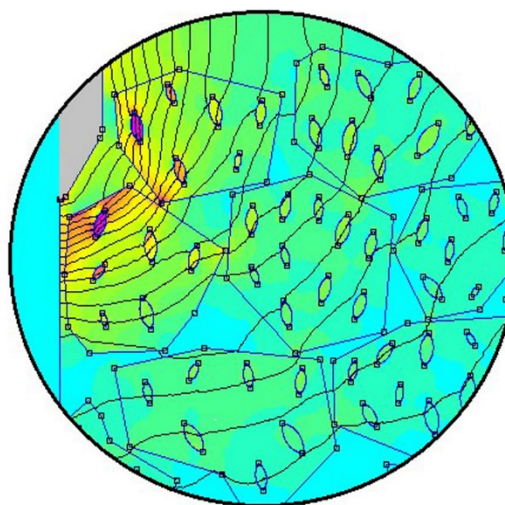


Рис. 6. Распределение напряжённости поля по материалу при наличии в нём полостей, заполненных воздухом

Fig. 6. Distribution of field intensity across the material in the presence of cavities filled with air

На рисунках 5 и 6 наглядно показана ориентация линий поля по границам раздела между материалом и полостями (см. рис. 6) и, соответственно, через сечение самих полостей (см. рис. 7). Объясняется это существенной разницей в диэлектрической проницаемости рассматриваемых сред. Диэлектрическая проницаемость воздуха значительно меньше диэлектрической проницаемости воды

и электрокорунда, поэтому полости, заполненные воздухом, ориентируют линии поля через своё сечение, а водные полости образуют границу раздела с материалом образца, что также приводит к значительному изменению картины напряжённости поля и ориентации линий по этим границам.

Для сравнения на рис. 7 представлен идеализированный случай — материал без полостей, пустот и вкраплений. Отчётливо видна разница в распределении линий напряжённости поля по материалу при сравнении с моделями на рисунках 5 и 6. Из-за того что в материале отсутствуют полости, линии поля распределяются достаточно равномерно по сечению образцов и, что очевидно, не наблюдаются дополнительные очаги неоднородностей и стягивания линий поля в конкретных областях материала. В данном случае гораздо проще спрогнозировать траекторию прохождения разряда, но при этом стоит учесть вероятность снижения эффективности дробления и повышения энергозатрат на единичный импульс (за счёт увеличенного времени на формирование импульса).

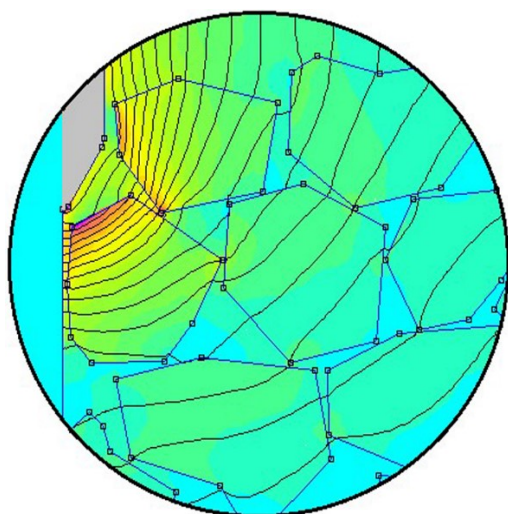


Рис. 7. Распределение напряжённости поля по материалу без полостей и вкраплений (идеализированный образец)

Fig. 7. Distribution of field intensity across the material without cavities and inclusions (idealized sample)

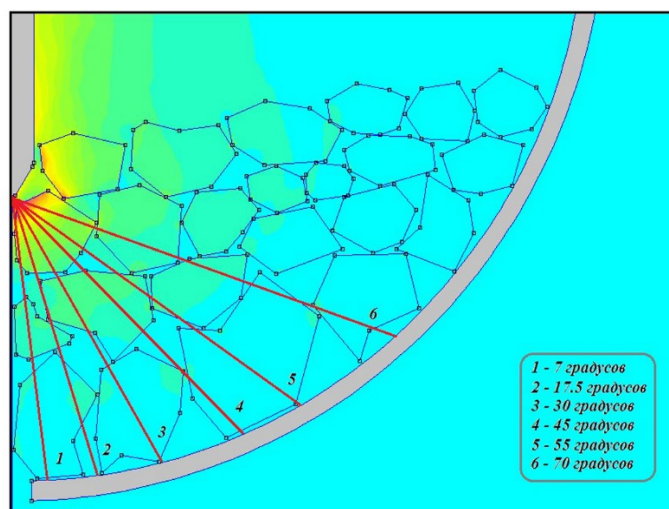


Рис. 8. Траектории линий расчёта

Fig. 8. Trajectories of calculation lines

Для дальнейшей оценки полученных результатов моделирования необходимо произвести построение линий расчёта значений напряжённости в конкретной точке материала. Для этого при помощи специальных инструментов FEMM 4.2 были определены траектории их прохождения и выполнено построение. Каждая линия расчёта приравнивается к потенциально возможной траектории прохождения электрического импульса через образец материала в момент срабатывания емкостных накопителей экспериментальной установки. Цель построения линий заключается в необходимости получения массива точек (значений напряжённости) и, соответственно, последующего формирования по ним зависимостей в виде графиков, по которым можно будет произвести сравнительный анализ величин напряжённости при различных внутренних структурах образцов материала. На рис. 8 представлены траектории прохождения линий расчёта напряжённости через образцы материала в экспериментальной модели.

Каждая линия расчёта характеризуется двумя параметрами: углом отклонения относительно вертикальной оси и длиной в миллиметрах (расстояние от нижней точки острейшего электрода до поверхности чашевидного). Длина расчётных линий увеличивается с ростом угла отклонения от вертикальной оси, а также за счёт того, что поверхность чашевидного электрода, находящаяся под острым электродом, имеет различный радиус кривизны. Это, в свою очередь, оказывает значительное

влияние на распределение напряжённости поля и, соответственно, на разрядные процессы, так как увеличиваются длина межэлектродного промежутка и объём образцов между электродами. Для наглядного сравнения линии расчёта имеют строго прямолинейную форму.

По полученному массиву точек были построены необходимые графические зависимости. В качестве примеров для демонстрации будут приведены графики, соответствующие расчётным линиям под номерами 1 и 4 (см. рис. 8). Сравнение было выполнено следующим образом: график напряжённости поля, в случае когда материал не содержит в своём объёме полостей и пустот, будет присутствовать на каждой системе координат, и далее на него поочерёдно для соответствующего угла отклонения будет накладываться график напряжённости для случаев с водными и воздушными полостями в объёме материала. Наложение графиков друг на друга позволит определить разницу в значениях напряжённости поля и, соответственно, выявить влияние нахождения полостей в материале на динамику разрядных процессов. На рисунках 9 и 10 будут представлены результаты наложения графиков напряжённости друг на друга.

На рисунках 9 и 10 красным цветом обозначается график распределения напряжённости поля по материалу при отсутствии в нём каких-либо полостей (пустот) и вкраплений. В данном случае наблюдается достаточно равномерное распределение величин напряжённости поля по всей траектории расчётной линии. Далее при введении в систему координат зависимостей, определяющих распределение напряжённости поля при заведомо известном расположении полостей и пустот в материале, наблюдается появление колебаний напряжённости, оказывающих значительное влияние на динамику разрядных процессов.

Отдельно стоит отметить, что при увеличении угла отклонения линии расчёта относительно вертикальной оси происходит возрастание интенсивности колебаний напряжённости, а также наблюдается смещение пиковых значений напряжённости поля в материале на участке от 0 до 8 мм. Смещение пиковых значений объясняется близким расположением полостей, заполненных водой или воздухом, относительно края образца материала и поверхности потенциального электрода. Близко расположенная полость стягивает на себя линии поля, тем самым снижая уровень напряжённости на близлежащих к потенциальному электроду точках (см. рис. 10). При этом за счёт процесса стягивания на границе раздела полости и материала или же в сечении самой полости (в зависимости от того, чем заполнена полость — жидкостью или воздухом) образуются очаги с повышенной напряжённостью, гораздо большей по амплитуде своих значений, чем вблизи поверхности потенциального электрода.

Выводы

Наличие в дробимом материале полостей и пустот, заполненных жидкой средой или же воздухом, оказывает значительное влияние на динамику разрядных процессов. Исходя из результатов моделирования, можно заключить, что полости и пустоты стягивают на себя линии напряжённости, тем самым изменяя общую картину поля. Создавая повышенное количество очагов неоднородности, полости и пустоты распределяют напряжённость поля по всему объёму дробимого материала, что положительно сказывается на разрядных процессах и, соответственно, повышает эффективность дробления конкретного образца материала.

Очевидно, что просчитать расположение полостей и пустот в материале до начала электроимпульсного воздействия весьма проблематично, но по крайней мере возникает необходимость визуальной оценки структуры материала, который подлежит дроблению. Изначально плотный материал с низкой пористостью не способен вобрать в себя жидкую среду, в которой будет происходить дробление, поэтому в данном случае необходимо опираться на его прочностные механические и электрические характеристики, в противном случае дробление будет неэффективным.

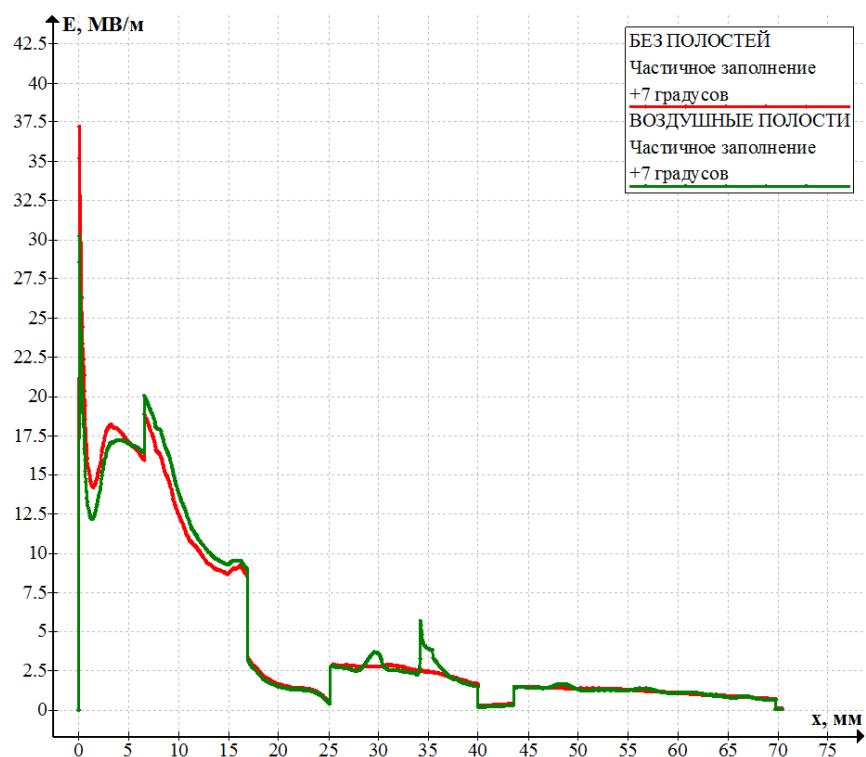
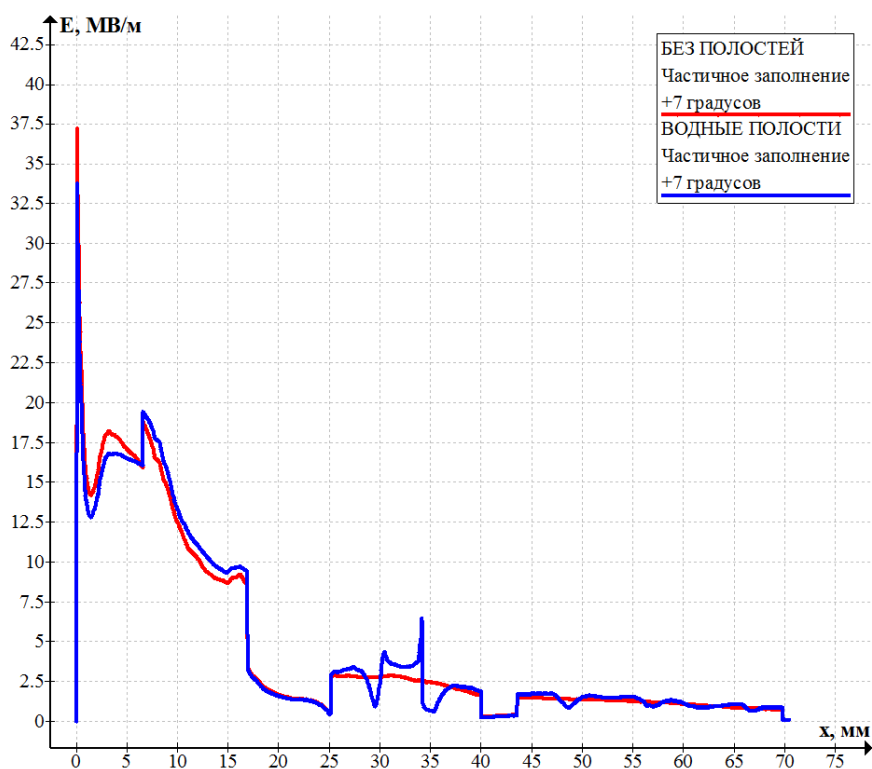


Рис. 9. Распределение напряжённости поля по материалу при отклонении линии расчёта от вертикальной оси на 7 градусов

Fig. 9. Distribution of the field intensity across the material at 7 degrees deviation of the calculation line from the vertical axis

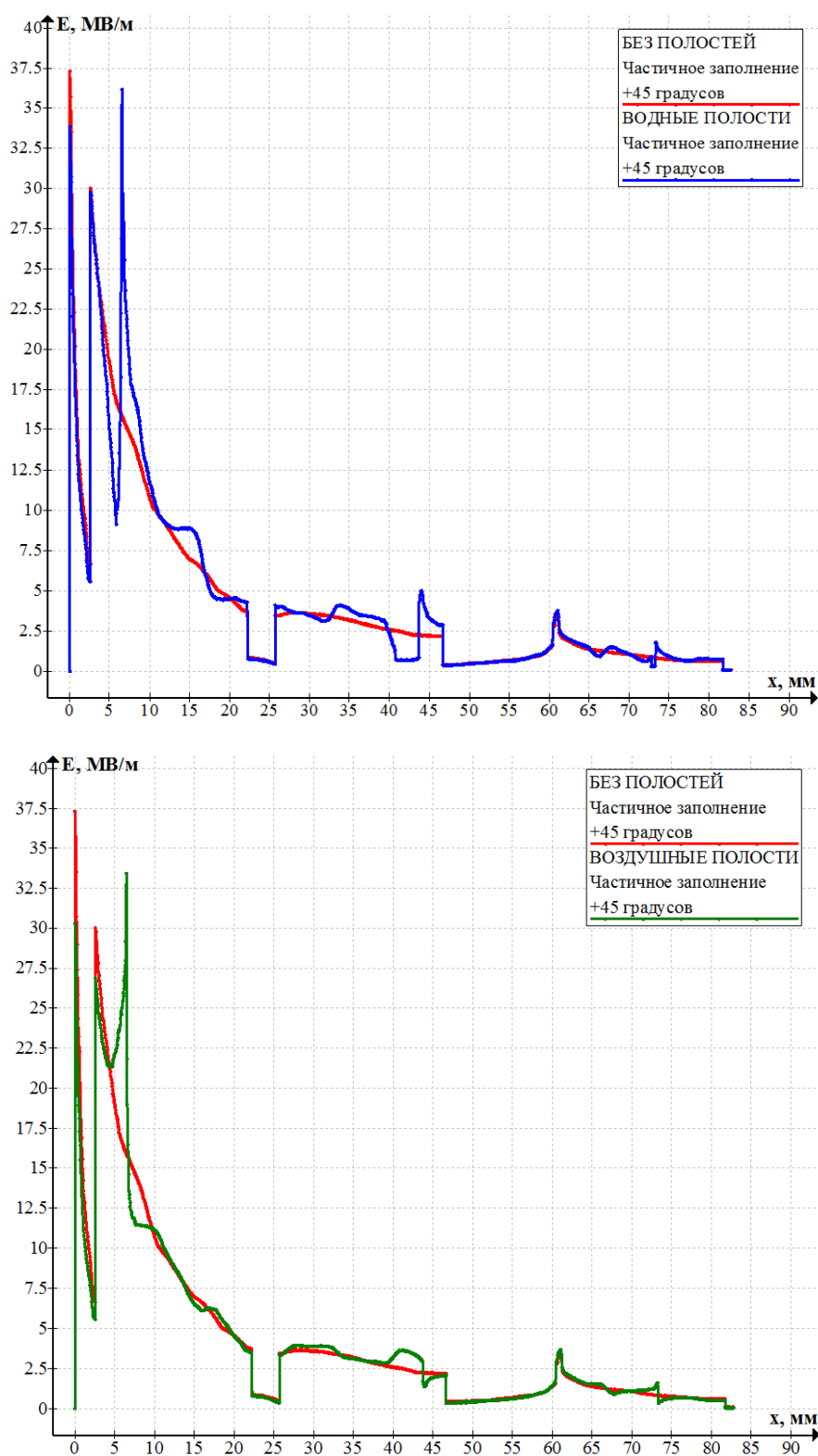


Рис. 10. Распределение напряжённости поля по материалу при отклонении линии расчёта от вертикальной оси на 45 градусов

Fig. 10. Distribution of the field intensity across the material at 45 degrees deviation of the calculation line from the vertical axis

Список источников

1. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. 324 с.
2. Данилин А. Н., Климов А. А. Режимы работы группы генераторов импульсного напряжения с общей технологической нагрузкой // Труды КНЦ РАН. 2018. № 8. С. 116–122.
3. Потокин А. С., Климов А. А. Сравнительный анализ эффективности электроимпульсного разрушения различных типов горных пород Мурманской области // Труды КНЦ РАН. 2020. № 11. С. 92–97.
4. Климов А. А. Исследование схем синхронизации высоковольтных импульсных источников // Труды КНЦ РАН. 2019. № 5. С. 96–104.
5. Расчёт потерь энергии при пробое проводящих сред / В. И. Курец, Г. П. Филатов, А. И. Жучков, А. Ю. Юшков // Электронная обработка материалов. 2003. № 6. С. 37–43.

References

1. Kurec V. I., Usov A. F., Cukerman V. A. *Jelektroimpul'snaja dezintegracija materialov* [Electrical pulse disintegration of materials]. Apatity, Pbl. Kol'skogo nauchnogo centra RAN, 2002, 324 p. (In Russ.).
2. Danilin A. N., Klimov A. A. Rezhimy raboty gruppy generatorov impul'snogo naprjazhenija s obshhej tehnologicheskoy nagruzkoj [Modes of operation of a group of pulse voltage generators with a common technological load]. *Trudy KNC RAN* [Transactions of the Kola Science Centre], 2018, no. 8, pp. 116–122. (In Russ.).
3. Potokin A. S., Klimov A. A. Sravnitel'nyj analiz jeffektivnosti jelektroimpul'snogo razrushenija razlichnyh tipov gornyh porod Murmanskoj oblasti [Comparative analysis of the efficiency of electric pulse destruction of various types of rocks of the Murmansk region]. *Trudy KNC RAN* [Transactions of the Kola Science Centre], 2020, no. 11, pp. 92–97. (In Russ.).
4. Klimov A. A. Issledovanie shem sinhronizacii vysokovol'tnyh impul'snyh istochnikov [Investigation of synchronization schemes of high-voltage pulse sources]. *Trudy KNC RAN* [Transactions of the Kola Science Centre], 2019, no. 5, pp. 96–104. (In Russ.).
5. Kurec V. I., Filatov G. P., Zhuchkov A. I., Jushkov A. Ju. Raschjot poter' jenergii pri proboe provodjashhih sred [Calculation of energy losses during breakdown of conductive media]. *Jelektronnaja obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials], 2003, no. 6, pp. 37–43. (In Russ.).

Информация об авторе

А. С. Зорин — лаборант-исследователь.

Information about the author

A. S. Zorin — Laboratory Assistant — Researcher.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 08.10.2022.
The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 08.10.2022.

Научная статья
УДК 622; 621.3
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.010

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД С ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ЛАБОРАТОРНОМ ОБРАЗЦЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

**Александр Сергеевич Потокин^{1,2}, Андрей Александрович Климов³,
Виталий Валентинович Колобов⁴**

¹Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия,
electric.pulse@mail.ru

²«Технологии электроимпульсной дезинтеграции материалов», Апатиты, Россия

^{3,4}Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

³*a.klimov@ksc.ru*

⁴*v.kolobov@ksc.ru*

Аннотация

Получены данные по общим и удельным энергетическим характеристикам электроимпульсного воздействия на образцы горных пород горно-обогатительных комбинатов (ГОК) Мурманской области, позволяющие определить необходимое количество энергии в импульсе для достижения эффекта максимального высвобождения полезных компонентов. Химический и минералогический анализы горных пород до и после электроимпульсного воздействия подтверждают высокую эффективность использования способа для повышения высвобождения полезных компонентов из образцов горных пород ГОКов акционерных обществ «Олкон» и «Апатит».

Ключевые слова:

электроимпульсная дезинтеграция, промышленная электроимпульсная установка, разупрочнение горных пород

Благодарности:

работа выполнена в рамках проекта «Создание промышленной электроимпульсной установки для повышения эффективности освоения рудных месторождений» по программе «СТАРТ-1» (договор № 3614ГС1/60501 от 20 июля 2020 г. между ООО «ТЕХЭДМ» и Федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям). Регистрационный номер научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы в Единой государственной информационной системе учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения АААА-А20-120082790055-5.

Для цитирования:

Потокин А. С., Климов А. А., Колобов В. В. Исследование горных пород с обогатительных комбинатов Мурманской области на лабораторном образце электроимпульсной дезинтеграционной установки // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 97–110. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.010

Original article

RESEARCH OF ROCKS FROM MINING PLANTS OF MURMANSK REGION ON A LABORATORY SAMPLE OF ELECTRIC PULSE DISINTEGRATION INSTALLATION

Aleksandr S. Potokin^{1,2}, Andrei A. Klimov³, Vitalii V. Kolobov⁴

¹Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
electric.pulse@mail.ru

²Technologies of Electro-pulse Disintegration of Materials, Apatity, Russia

^{3,4}Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia

³*a.klimov@ksc.ru*

⁴*v.kolobov@ksc.ru*

Abstract

Data on the general and specific energy characteristics of the electric pulse impact on rock samples of mining and processing plants (MPP) of the Murmansk region, allowing to determine the required amount of energy in a pulse to achieve the effect of maximum release of useful components, were obtained. Chemical and mineralogical analyses of rocks before and after electric pulse disintegration confirm the high efficiency of using the method to increase the release of useful components from rock samples of mining and processing plants of JSC Olkon and JSC Apatit.

Keywords:

electric pulse disintegration, industrial electric pulse installation, pre-weakening rocks

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the project "Creation of an industrial electric pulse installation to improve the efficiency of ore deposits development" under the START-1 Program (Contract No. 3614GS1/60501 dated 07/20/2020 between LLC "TECHEDM" and the Federal State Budgetary Institution "Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology" (Foundation for the Promotion of Innovation). Registration number of research and development work in the Unified State Accounting Information System of Research and Development Civil Activities AAAA-A20-120082790055-5.

For citation:

Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V. Research of rocks from mining plants of Murmansk region on a laboratory sample of electric pulse disintegration installation // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 97–110. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.010

Введение

В статье представлены результаты НИОКР «Исследование горных пород и лабораторного образца, разработка, изготовление и испытания прототипа электроимпульсной установки для оценки эффективности применения электроимпульсного способа на различных горных породах, обогащаемых на горно-обогатительных комбинатах», выполненной в рамках проекта по программе «СТАРТ-1» Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям).

Целями работы являлись: 1) определение оптимального энергетического режима электроимпульсного воздействия на рудах, обогащаемых на ГОКах Мурманской области с использованием прототипа электроимпульсной установки; 2) исследование и оптимизация энергетических режимов лабораторного образца электроимпульсной установки для получения максимального выхода полезного компонента из горных пород ГОКов; 3) изучение результатов минералогического и химического анализов горных пород, руд, хвостов ГОКов до и после электроимпульсного воздействия.

Для достижения указанных целей были поставлены следующие задачи: 1) определение минимально необходимых амплитуды напряжения и тока на нагрузке (горной породы, руды, шлака) для создания в объекте разрушения магистральных трещин для последующего высвобождения из них максимального количества полезного компонента; 2) выбор оптимальной крутизны фронта генерируемого импульса для эффективного внедрения разряда в объект воздействия и последующего разрушения (разупрочнения); 3) определение минимально необходимого количества энергии в импульсе для достижения эффекта разрушения (разупрочнения) объекта и отделения полезного компонента от пустой породы; 4) выполнение минералогического и химического анализов контрольных образцов горных пород и образцов после электроимпульсного воздействия для определения максимального / минимального размера фракции разрушаемого материала с сохранением эффекта высвобождения полезного компонента в электроимпульсном и электрогидроимпульсном режимах.

Исследование горных пород ГОКов на лабораторном образце электроимпульсной дезинтеграционной установки

Электроимпульсный (ЭИ) метод разрушения минерального сырья основан на создании канала электрического пробоя в разрушаемом материале за счёт приложения высокого напряжения к образцу и последующего быстрого расширения канала пробоя внутри образца [1]. При этом, в отличие от традиционных механических методов дробления, использующих деформации сжатия и сдвига, образец испытывает деформации растяжения в направлениях расширения канала. Электрический пробой минералов производится в диэлектрических жидкостях, из которых наиболее часто используемой является техническая вода. Внедрение разряда в образец происходит лишь в том случае, когда вольт-секундная характеристика (зависимость пробивного напряжения от длительности приложенного импульса — ВСХ) пробоя помещённого в жидкость минерала проходит ниже, чем ВСХ пробоя окружающей образец жидкости. Канал электрического пробоя в основном развивается по границам раздела фаз в неоднородных материалах, по газовым полостям и проводящим включениям в однородных твердых материалах, по дефектам решётки и границам кристаллографических плоскостей в материалах с кристаллической структурой. Условия для эффективного внедрения разряда в породу и её разрушения могут быть сформулированы следующим образом: для электрического пробоя минералов необходима достаточная амплитуда напряжения импульса, превышающая электрическую прочность минералов;

для превышения ВСХ пробоя диэлектрической жидкости уровня ВСХ минералов должен быть сформирован достаточно крутой фронт импульса напряжения, обеспечивающий внедрение искрового разряда в горную породу; для послепробойного разрушения горной породы необходимо обеспечить достаточное количество энергии в разряде.

Для проведения опытов по воздействию на образцы горных пород был использован генератор импульсных напряжений (ГИН) положительной полярности, собранный по схеме Аркадьева — Маркса [2]. В качестве рабочей ёмкости для дробления выступала дробильно-измельчительная камера. Принципиальная схема модельной установки изображена на рис. 1.

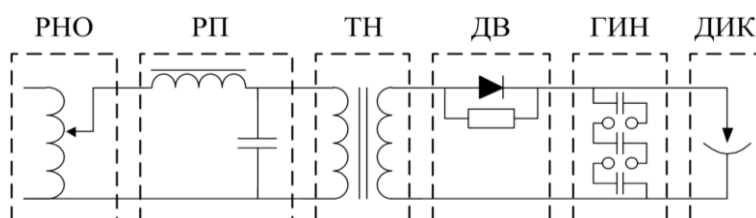


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки: PHO — однофазный регулятор напряжения; RP — резонансный преобразователь; TH — трансформатор напряжения; ДВ — диодный выпрямитель; ГИН — генератор импульсного напряжения; ДИК — дробильно-измельчительная камера
Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory installation: PHO — single-phase voltage regulator; RP — resonant converter; TH — voltage transformer; ДВ — diode rectifier; ГИН — voltage pulse generator; ДИК — crushing and grinding chamber

Питание схемы осуществлялось от регулируемого автотрансформатора через повышающий преобразователь, состоящий из резонансного контура и трансформатора напряжения. С высоковольтной обмотки повышающего трансформатора напряжения через диодный столб, составленный из 20 последовательных диодов КЦ201Е, заряжались ёмкости ГИН, включенные параллельно. После зарядки ёмкостей ГИН происходил пробой в камере с измельчаемой породой.

Принципиальная схема семиступенчатого ГИН изображена на рис. 2. На первом этапе работы генератора его ёмкости параллельно заряжаются через защитное сопротивление и катушки индуктивности. Использование катушек позволяет обеспечить практически одновременный заряд ёмкостей до одного и того же напряжения. На втором этапе после достижения уровня зарядного напряжения, необходимого для пробоя задающего разрядника, все ступени генератора самоходом коммутируются остальными разрядниками в последовательную цепочку. При этом после пробоя отделительного разрядника на нагрузку поступает напряжение, практически равное произведению величины зарядного напряжения на количество ступеней генератора, обеспечивая тем самым разряд в рабочей камере и разрушение породы.

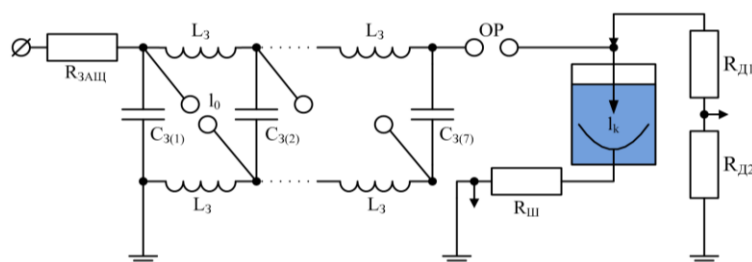


Рис. 2. Схема генератора импульсных напряжений вместе с рабочей камерой:
 $R_{зщ}$ — защитное сопротивление; L_3 — катушки индуктивности; C_3 — конденсаторы; I_0 — задающий шаровой разрядник; OP — отделительный шаровой разрядник; I_k — рабочий промежуток дробильно-измельчительной камеры; $R_{ш}$ — измерительный токовый шунт; $R_{д1}, R_{д2}$ — сопротивления верхнего и нижнего плеч делителя напряжения
Fig. 2. Electrical diagram of the pulse voltage generator with the working chamber:
 $R_{зщ}$ — protective resistance; L_3 — inductance coils; C_3 — capacitors; I_0 — main spark gap; Sr — separating spark gap; I_k — working gap in chamber; $R_{ш}$ — current shunt; $R_{д1}, R_{д2}$ — resistances of the upper and lower resistors of the voltage divider

На рисунке 3 изображено конструктивное исполнение дробильно-измельчительной камеры. Ее рабочим органом является электродная пара с конфигурацией «острие-полусфера»; в промежутке которой и происходил высоковольтный пробой измельчаемой породы. Потенциальный электрод представляет собой заостренный стержень, закрепленный внутри проходного изолятора. Металлические сита-классификаторы полусферической формы являются заземленным электродом. При разряде ГИН на конце острия потенциального электрода возникает повышенная напряженность электрического поля, что обеспечивает последующий пробой измельчаемой породы. Полиэтиленовая стенка камеры, помимо обеспечения подвода породы в рабочий промежуток, также служит барьером между потенциальным электродом и заземленной станиной камеры. В процессе дробления проходящая через сито порода скапливается в металлическом баке под ситом.

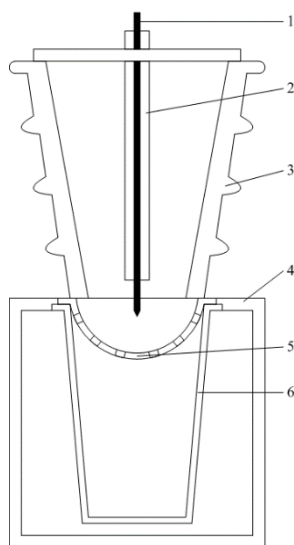


Рис. 3. Конструкция дробильно-измельчительной камеры:

1 — потенциальный электрод; 2 — проходной изолятор; 3 — полиэтиленовая стенка камеры; 4 — станина камеры; 5 — заземлённое сито-классификатор; 6 — бак для измельчённой породы

Fig. 3. The design of the crushing and grinding chamber:

1 — HV electrode; 2 — insulator; 3 — polyethylene wall of the chamber; 4 — chamber frame; 5 — grounded sieve classifier; 6 — tank for crushed rock

В опытах по измельчению пород в качестве заземлённого электрода использовались сита с ячейками 15 и 5 мм. При воздействии на пульпу вместо сит использовалась металлическая чаша полусферической формы с внутренней стороны. После нескольких начальных импульсов пульпа давала усадку, поэтому длина рабочего промежутка однократно менялась, но большая часть импульсов подавалась при постоянной установленной длине промежутка.

Электроимпульсное воздействие на образцы горных пород проводилось при максимальных энергетических параметрах ГИН. Такой подход был обусловлен тем, что электрические свойства некоторых образцов горных пород были неизвестны [3–5]. Рабочие конструктивные и энергетические параметры установки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рабочие параметры модельной установки
 Operating parameters of the model installation

Зарядное напряжение, кВ	Ёмкость ГИН в ударе, нФ	Напряжение в импульсе, кВ	Расчётная энергия в импульсе, Дж	Рабочий промежуток в ДИК, мм
45	29	315	1417,5	30 ÷ 60

Порядок проведения экспериментов: 1) отбор и взвешивание пробы горной породы для воздействия; 2) проверка и регулировка промежутков шаровых разрядников ГИН; 3) установка начальной длины рабочего промежутка l_k -камеры; 4) загрузка пробы в камеру, заполнение её водой; 5) уменьшение длины рабочего промежутка по мере измельчения пробы (для кусков пород) / воздействие импульсами при постоянной длине рабочего промежутка (для пульпы); 6) разгрузка камеры по окончании воздействия; 7) сушка материала, подвергнутого воздействию, классификация по фракциям.

Из всех видов материалов предварительно отделялись фракции менее 0,25 и 0,5 мм в качестве контрольных образцов. При проведении опытов с пульпой проводились измерения напряжения на нагрузке и тока через нагрузку с помощью резистивного делителя напряжения и токового шунта.

Опыты по дроблению производились в несколько этапов. В качестве минимальной фракции при классификации выходных продуктов дробления была принята фракция менее 2 мм. Опыты завершились при отделении фракций менее 0,25 и 0,5 мм из суммарного количества фракции менее 2 мм со всех этапов для сравнения с контрольными образцами.

Контрольные образцы: 1) руда АО «Олкон» с 72-го конвейера; 2) руда АО «Олкон» с 58-го конвейера; 3) пульпа АО «Олкон»; 4) руда ОАО «Апатит» среднего дробления; 5) руда ОАО «Апатит» мелкого дробления; 6) пульпа подрешётного продукта ОАО «Апатит».

Перед проведением экспериментов по ЭИ воздействию из всех видов были выделены контрольные образцы фракции менее 0,25 и 0,5 мм, исходя из доступного количества материала. Массы выделенных контрольных образцов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Массы отделенных контрольных образцов, г
 Masses of separated control samples, grams

Материал	Менее 0,5 мм	Менее 0,25 мм
Руда 72-го конвейера	200	32
Руда 58-го конвейера	600	200
Пульпа АО «Олкон»	600	200
Руда среднего дробления	530	122
Руда мелкого дробления	600	200
Пульпа ОАО «Апатит»	600	200

Таким образом, было выделено 12 образцов. Данные образцы не подвергались ЭИ воздействию и были отобраны в качестве фракций после механического дробления для сравнения с опытными фракциями.

Перед воздействием на образцы пульпы оба образца были просушены, затем отобраны навески массой 1500 г. Всего было подано по 100 импульсов на каждую навеску. Большая часть импульсов была подана при длине рабочего промежутка камеры 45 мм после усадки пульпы. Выходные данные по опытам представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры экспериментов с образцами пульпы
 Parameters of experiments with pulp samples

Образец пульпы	Масса материала до воздействия, г	Масса материала после воздействия, г	Рабочий промежуток, мм	Количество импульсов	Общие энергозатраты, кВт · ч
АО «Олкон»	1500	1469	50	6	0,039
			45	94	
ОАО «Апатит»	1500	1465	50	6	0,039
			45	94	

В процессе воздействия часть пульпы перешла во взвесь, полное осаждение которой было невозможно при имеющейся конструкции модельной установки и в условиях проведённого эксперимента. Этим обусловлено изменение массы материала после воздействия.

На рисунке 4 изображены характерные осциллограммы процессов ЭИ воздействия на пульпу АО «Олкон» (а) и ОАО «Апатит» (б). Различие в форме и величине напряжения указывает на высокую проводимость пульпы АО «Олкон», тогда как пульпа ОАО «Апатит» в начальные моменты времени проявляет диэлектрические свойства, что объясняет задержку пробоя промежутка с ней в 0,6 мкс.

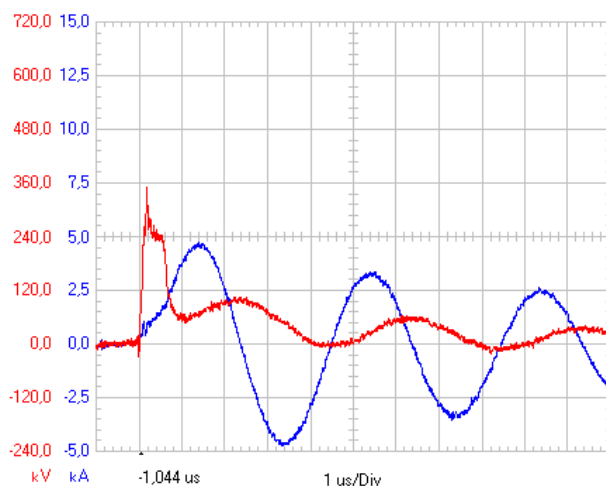


Рис. 4. Осциллограмма напряжения и тока при пробое промежутков с пульпой
Fig. 4. Oscillogram of voltage and current during the breakdown of gaps with pulp

Массы навесок пород для ЭИ воздействия выбирались, исходя из количества доступного крупнокускового материала. Удельные энергетические затраты на измельчение рассчитывались по отношению к массе полезной фракции без учёта нераздробленного материала. Опыты по ЭИ измельчению были разделены на три этапа:

1. Произведено воздействие на большие образцы руды 72-го конвейера АО «Олкон» и руды среднего дробления ОАО «Апатит» на сите 15 мм для оценки распределения фракций выходного продукта (без учёта нераздробленного материала) при одном и том же отношении количества поданных импульсов к массе навески и для получения более мелких образцов. Процентный фракционный состав выходного продукта приведен на рис. 5, масса навесок и энергетические затраты на осуществление воздействия дана в табл. 4.

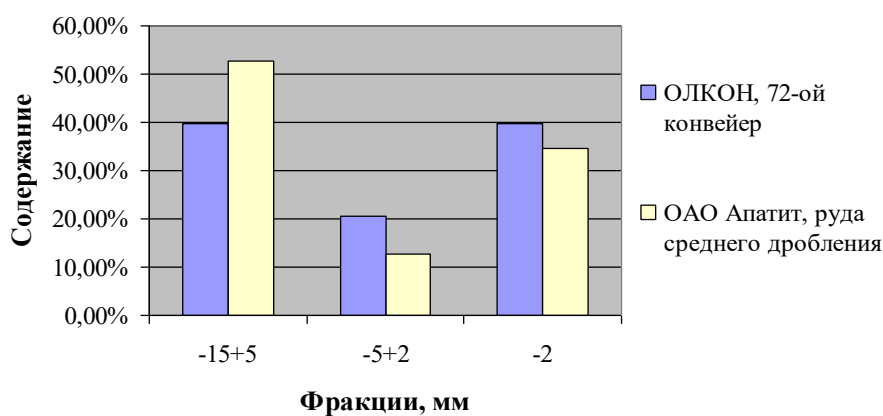


Рис. 5. Распределение полезной фракции после ЭИ воздействия на сите 15 мм
Fig. 5. Distribution of useful fraction after electric pulse disintegration on 15 mm sieve

Таблица 4

Массы навесок образцов и энергетические затраты на измельчение на сите 15 мм
 Sample weights and energy costs for grinding on 15 mm sieve

Материал	Масса начальной навески, г	Общие энергозатраты, кВт · ч	Удельные энергозатраты на измельчение, кВт · ч / т
Руда 72-го конвейера	4870	0,044	16,59
Руда среднего дробления	2460	0,022	12,91

При схожих величинах удельных энергетических затрат на измельчение заметно преобладание крупной фракции для конечного продукта руды ОАО «Апатит», что является положительным моментом при стадийном дроблении, так как снижено количество переизмельченного материала на данной стадии.

2. Проведен опыт по воздействию на сите с ячейками 5 мм с уменьшением рабочего промежутка дробильно-измельчительной камеры до критической длины в 30 мм, после которой электродинамическое воздействие (электроимпульсное) переходило в электрогидравлическое (гидроудар). Энергетические параметры воздействия оставались неизменными. Массы навесок и энергетические затраты сведены в табл. 5. Фракционный состав образцов изображён на рис. 6.

При таком способе воздействия (до достижения критической длины промежутка) все виды предоставленных материалов продемонстрировали схожий состав конечного продукта. Однако при соотнесении фракционного состава с величиной удельных энергетических затрат можно сделать вывод, что ЭИ дробление руды ОАО «Апатит» более энергоэффективно, что объясняется высокой проводимостью руды АО «Олкон». Также энергетические затраты свидетельствуют о том, что навески, частично состоящие из образцов со стадии с ситом 15 мм (руда 72-конвейера и руда среднего дробления), разрушались эффективнее на сите 5 мм. Данный эффект можно объяснить дополнительным снижением механической прочности материалов из-за воздействия на них ударных волн в жидкости при импульсных пробоях.

Таблица 5

Массы навесок образцов и энергетические затраты на измельчение на сите 5 мм
 Weights of samples and energy costs for grinding on 5 mm sieve

Материал	Масса начальной навески, г	Общие энергозатраты, кВт · ч	Удельные энергозатраты на измельчение, кВт · ч / т
Руда 72-го конвейера	2188	0,055	36,85
Руда 58-го конвейера	1662	0,103	84,21
Руда среднего дробления	1305	0,020	21,03
Руда мелкого дробления	1542	0,037	28,69

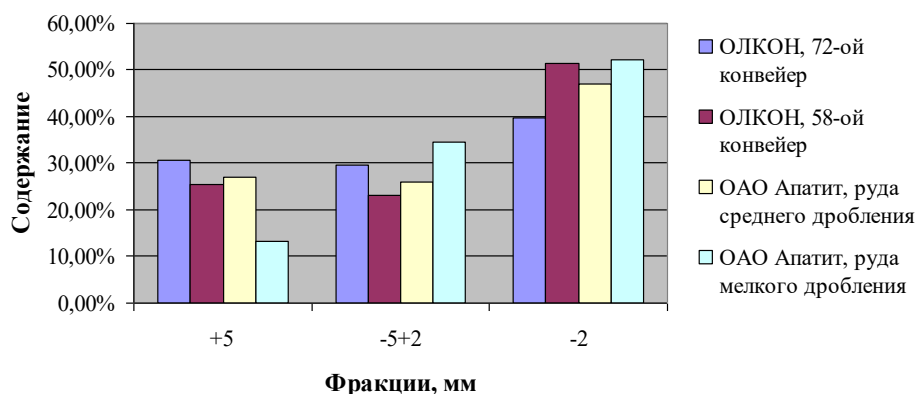


Рис. 6. Распределение полезной фракции после ЭИ воздействия на сите 5 мм
 Fig. 6. Distribution of useful fraction after electric pulse disintegration on 5 mm sieve

3. Классификация по фракциям навесок менее 0,5 и 0,25 мм была проведена на сите 2 мм, фракции -5 + 2 мм — на сите 5 мм. Дробление проводилось до достижения критической длины рабочего промежутка в камере. Удельные энергетические затраты на этом этапе показаны в табл. 6, процентное распределение конечных фракций изображено на рис. 7.

Таблица 6

Масса навесок образцов и энергетические затраты на измельчение на сите 2 мм
Weights of samples and energy costs for grinding on 2 mm sieve

Материал	Масса начальной навески, г	Общие энергозатраты, кВт · ч	Удельные энергозатраты на измельчение, кВт · ч / т
Руда 58-го конвейера	796	0,043	71,12
Руда среднего дробления	680	0,028	44,31
Руда мелкого дробления	717	0,033	72,13

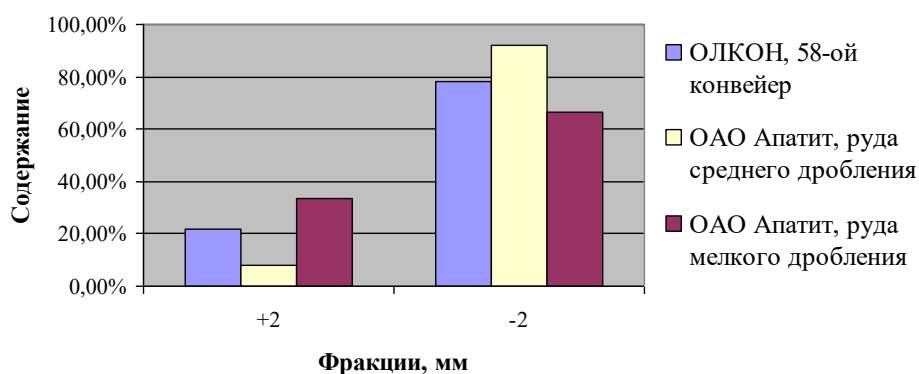


Рис. 7. Распределение полезной фракции после ЭИ воздействия на сите 2 мм
Fig. 7. Distribution of useful fraction after electric pulse disintegration on 2 mm sieve

Заметно значительное снижение энергоэффективности процесса ЭИ воздействия из-за уменьшения объёма разрушаемого за единичный импульс материала при тех же электрических параметрах воздействия. Предположительно, уменьшение количества энергии в импульсе и увеличение частоты разрядов ГИН позволят повысить эффективность процесса разрушения на данной стадии.

После проведения опытов из совокупной массы минимальной фракции менее 2 мм были отделены навески 12 образцов для последующего сравнения с контрольными образцами. Массы навесок сведены в табл. 7.

Таблица 7

Масса отделенных образцов после ЭИ воздействия, г
Masses of separated samples after electric pulse disintegration, grams

Материал	Масса начальной навески, г	Общие энергозатраты, кВт · ч	Удельные энергозатраты на измельчение, кВт · ч / т
Руда 58-го конвейера	796	0,043	71,12
Руда среднего дробления	680	0,028	44,31
Руда мелкого дробления	717	0,033	72,13

Анализ результатов минералогического и химического анализов горных пород, руд, хвостов ГОКов до и после ЭИ воздействия

В таблицах 8 и 10 представлены результаты химического и минералогического анализов образцов горных пород, руд и хвостов ГОКов до и после ЭИ воздействия. В таблицах 9 и 11 представлен дополнительный выход полезных компонентов из образцов горных пород АО «Олкон» и ОАО «Апатит» после ЭИ воздействия в процентном соотношении масс. Каждый образец горной породы, представленный в таблицах, был отобран сотрудниками ГОКов с одной из стадий дробления действующего цикла обогащения и передан для проведения исследований.

Заключение

Полученные результаты проведенных НИОКР позволили подтвердить возможность получения дополнительного выхода полезного компонента из горных пород, руд, шлаков ГОКов АО «Олкон» и ОАО «Апатит» после их ЭИ обработки по сравнению с контрольными образцами, которые не были подвержены ЭИ воздействию.

Оценка результатов химического и минералогического анализов, представленная в таблицах 8 и 10, показала, что после ЭИ воздействия на образцы горных пород горно-обогатительных комбинатов АО «Олкон» и ОАО «Апатит» процент высвобождения таких минералов, как кварц, магнетит, апатит, нефелин, ильменит, в зависимости от фракции и стадии дробления породы, может быть увеличен на 7,59, 29,12, 0,57, 25,18, 113,79 % соответственно. Особенно интересен результат дополнительного высвобожденного ильменита из апатит-нефелиновой руды после ЭИ обработки — 113,79 %. Ильменит и титаномагнетит являются ценными минералами для получения титана и его производных (оксида титана, ферротитана и других), применяемых для производства военной техники.

Средний дополнительный выход химических элементов SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_{\text{об}}$, Fe_2O_3 , FeO , MnO , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , SrO , F , SO_3 после обработки образцов горных пород АО «Олкон» (пульпа, руда 58-го конвейера) и ОАО «Апатит» (руда среднего дробления, руда мелкого дробления, пульпа) может быть увеличен на 9,07, 12,6, 118,3, 63,7 и 11 % соответственно.

Таблица 8

Химический анализ образцов горных пород АО «Олкон» и ОАО «Апатит»
 Chemical analysis of rock samples of Olkon JSC and Apatit JSC

№ п/п	Образцы пород	Содержание, масс. доля, %															Сумма	
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{сод.}	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	StO	F	SO ₃		гшп
1	(1) «Олкон», 72-й конвейер	69,86	0,17	11,43	4,56	1,95	4,12	0,090	3,79	3,41	1,73	1,71	0,39	<0,1	0,067	0,42	0,76	99,89
2	(1-1) «Олкон», 72-й конвейер ЭИ	74,14	0,10	11,31	4,17	1,70	3,84	0,047	2,20	2,50	1,70	1,52	0,060	<0,1	0,056	0,35	0,60	100,12
3	(2) «Олкон», пулыла	49,43	0,04	2,29	28,45	24,89	14,22	0,21	3,81	3,32	0,33	0,51	0,070	<0,1	0,025	1,15	<0,1	100,29
4	(2-1) «Олкон», пулыла ЭИ	50,49	0,04	2,33	27,28	23,56	13,91	0,21	4,03	3,44	0,34	0,51	0,100	<0,1	0,021	1,20	<0,1	100,18
5	(3) «Апатит», руда средн. дробл. ЭИ	20,01	2,23	8,51	2,44	1,78	1,54	0,11	32,46	0,51	2,49	3,70	22,93	1,83	2,18	0,082	0,62	100,99
6	(3-1) «Апатит», руда средн. дробл. ЭИ	35,98	3,97	12,87	5,61	4,69	3,00	0,21	15,09	0,90	4,83	6,93	8,44	0,86	0,83	0,17	1,35	100,12
7	(4) «Олкон», 58-й конвейер	47,85	0,05	4,44	27,93	24,18	14,19	0,16	3,43	3,53	0,70	0,49	0,080	<0,1	0,040	0,70	<0,1	99,84
8	(4-1) «Олкон», 58-й конвейер ЭИ	49,27	0,01	0,71	30,21	26,04	15,45	0,20	4,23	3,10	0,090	0,10	0,13	<0,1	0,024	0,70	<0,1	100,06
9	(5) «Апатит», руда мелк. дробл.	22,25	2,17	9,78	2,87	2,24	1,68	0,11	29,48	0,59	3,02	4,64	20,64	1,59	1,77	0,082	0,57	100,61
10	(5-1) «Апатит», руда мелк. дробл. ЭИ	30,90	3,39	12,75	5,18	3,77	3,28	0,18	18,69	1,33	4,08	6,68	12,39	1,10	1,05	0,11	0,44	100,14
11	(6) «Апатит», пулыла	31,98	2,45	14,63	4,15	3,38	2,30	0,15	18,33	1,11	4,31	6,48	12,22	1,01	1,04	0,065	0,83	100,29
12	(6-1) «Апатит», пулыла ЭИ	31,76	2,49	14,82	4,14	3,21	2,44	0,15	18,48	1,09	4,29	6,42	12,30	1,02	1,07	0,067	0,71	100,32

Таблица 9

Дополнительный выход химических элементов из образцов горных пород АО «Олкон» и ОАО «Апатит» после ЭИ воздействия, % соотношения массовых долей элементов до и после ЭИ воздействия
 Additional output of chemical elements from rock samples of JSC Olkon and JSC Apatit after electric pulse disintegration, % ratio of mass fractions of elements before and after electric pulse impact

Образцы / химический элемент	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{оц.}	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SrO	F	SO ₃	Среднее значение, %
(2-1) «Олкон», пыльца ЭИ	102,1	–	101,7	–	–	–	–	105,8	103,6	103,0	–	142,9	–	–	104,3	9,07
(3-1) «Апатит», руда средн. дробл. ЭИ	179,8	178,0	151,2	229,9	263,5	194,8	190,9	–	176,5	194,0	187,3	–	–	–	207,3	118,3
(4-1) «Олкон», 58-й конвейер ЭИ	103,0	–	–	108,2	107,7	108,9	125,0	123,3	–	–	–	–	–	–	–	12,6
(5-1) «Апатит», руда мелк. дробл. ЭИ	138,9	156,2	130,4	180,5	168,3	195,2	163,6	–	225,4	135,1	144,0	–	–	–	–	63,7
(6-1) «Апатит», пыльца ЭИ	–	101,6	101,3	–	–	106,1	–	100,8	–	–	–	100,7	101,0	102,9	103,1	11

Таблица 10

Минералогический состав образцов горных пород АО «Олкон» и ОАО «Апатит» до и после электронимпульсного воздействия
Mineralogical composition of rock samples of JSC Olkon and JSC Apatit before and after electric pulse impact

Геологический номер пробы	1	1-1	2	2-1	3	3-1	4	4-1	5	5-1	6	6-1
Общий вес пробы, г	232,00	951,00	800,00	800,00	652,00	903,00	800,00	800,00	800,00	608,00	800,00	800,00
Навеска, г	24,33	28,08	24,83	24,83	22,32	28,99	25,83	24,81	23,99	33,70	24,81	26,05
Вес тяжелой фракции, г	4,83	3,93	13,33	12,95	14,35	12,20	13,48	15,00	13,64	13,76	9,50	10,31
Кварц	71,02	78,50	43,00	45,00	—	—	42,37	39,72	—	—	—	—
Полевой шпат	1,42	0,74	0,99	0,84	6,77	14,07	0,19	0,04	7,52	11,75	12,38	10,47
Слюда	12,02	13,14	Д. зн.	0,05	Д. зн.	1,20	1,28	0,02	0,07	0,02	Д. зн.	Д. зн.
Амфибол	11,46	2,21	19,12	17,78	Д. зн.	Зн.	19,12	22,42	Зн.	Д. зн.	Д. зн.	0,05
Пироксен	Ед. зн.	Зн.	0,13	Д. зн.	8,07	16,03	Д. зн.	0,09	8,55	16,23	14,97	13,41
Магнетит	1,10	1,71	33,10	32,25	1,08	0,75	36,16	37,17	0,79	1,94	0,82	1,09
Апатит	1,17	1,59	1,32	1,33	56,36	20,74	0,19	0,33	50,79	30,49	29,89	30,06
Эпидот	Д. зн.	0,07	1,87	2,27	—	—	0,07	0,15	—	—	—	—
Силлиманит	1,71	1,49	Р. зн.	Ед. зн.	—	—	0,17	—	—	—	—	—
Сфен	0,04	Зн.	Ед. зн.	Ед. зн.	4,46	6,23	Ед. зн.	Ед. зн.	2,98	3,16	2,24	2,42
Пирит	0,06	0,03	0,47	0,46	—	—	0,09	0,06	—	—	—	—
Турмалин	Р. зн.	0,1	Д. зн.	Зн.	—	—	Ед. зн.	Ед. зн.	—	—	—	—
Гранат	Д. зн.	0,31	Зн.	Зн.	—	—	Зн.	Д. зн.	—	—	—	—
Лимонит	Р. зн.	Р. зн.	Р. зн.	Зн.	Ед. зн.	Р. зн.	Р. зн.	—	Р. зн.	Зн.	—	Зн.
Гематит	Зн.	—	Д. зн.	0,02	—	—	0,36	—	Ед. зн.	—	—	—
Карбонаты	Зн.	Зн.	Зн.	Ед. зн.	Р. зн.	5,66	Р. зн.	Зн.	Р. зн.	Ед. зн.	Р. зн.	Р. зн.
Пирротин	Ед. зн.	0,11	Зн.	—	Ед. зн.	Р. зн.	—	—	Ед. зн.	Р. зн.	—	Ед. зн.
Хлорит	Д. зн.	Р. зн.	Ед. зн.	—	—	—	—	Р. зн.	—	—	—	—
Молибденит	—	Ед. зн.	—	Ед. зн.	—	—	—	Ед. зн.	—	—	—	—
Халькопирит	—	—	Ед. зн.	Ед. зн.	—	—	—	Ед. зн.	—	—	—	—
Нефелин	—	—	—	—	22,47	33,04	—	—	28,19	34,36	38,59	41,14
Перовскит	—	—	—	—	Д. зн.	Д. зн.	—	—	0,05	0,04	Д. зн.	Д. зн.
Ломоносовит	—	—	—	—	Ед. зн.	Ед. зн.	—	—	—	Ед. зн.	—	Ед. зн.
Эвдиалит	—	—	—	—	Д. зн.	Ед. зн.	—	—	Зн.	Д. зн.	Ед. зн.	Р. зн.
Пектолит	—	—	—	—	Р. зн.	Зн.	—	—	Р. зн.	Зн.	Р. зн.	Зн.
Лампрофилит	—	—	—	—	0,32	1,86	—	—	0,66	0,93	0,78	0,60
Ильменит	—	—	—	—	0,47	0,42	—	Ед. зн.	0,40	1,08	0,33	0,52
Либерит	—	—	—	—	Д. зн.	Д. зн.	—	—	Д. зн.	Д. зн.	—	0,24
Итого, %	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Примечание. Д. зн. — десятки зёрен; Зн. — зёрна; Ед. зн. — единичные зёрна; Р. зн. — редкие зёрна; прочерк — минерал не обнаружен.

Таблица 11

Дополнительный выход минералов из образцов горных пород АО «Олкон» и ОАО «Апатит» после ЭИ воздействия, % соотношения масс выделенных элементов до и после ЭИ воздействия
 Additional output of minerals from rock samples of JSC Olkon and JSC Apatit after electric pulse impact, % ratio of masses of isolated elements before and after electric pulse impact

Геологический номер пробы	1	1-1	2	2-1	3	3-1	4	4-1	5	5-1	6	6-1
Кварц (7,59 %)		110,53	–	104,65	–	–	–	–	–	–	–	–
Магнетит (29,12 %)		155,45	–	–	–	–	–	102,79	–	–	–	–
Апатит (0,57 %)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100,57
Нефелин (25,18 %)	–	–	–	–	–	147,04	–	–	–	121,89	–	106,61
Ильменит (113,79 %)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	270,00	–	157,58

Список источников

1. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. СПб.: Наука, 1995. 276 с.
2. Патент на полезную модель 208969 U1. Генератор импульсных токов и напряжений для промышленной электроимпульсной установки / Потокин А. С., Климов А. А., Колобов В. В. № 2021118197; 22.06.2021; 25.01.2022.
3. Потокин А. С., Климов А. А. Сравнительный анализ эффективности электроимпульсного разрушения различных типов горных пород Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. № 7–19. С. 92–97.
4. Potokin A. S. Effectiveness evaluating of the use electric pulse comminution method in combined technology of slag dump copper-nickel production refining // IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress. 2019. P. 2963–2968.
5. Светлов А. В. Разработка методов обогащения для сложных объектов цветной металлургии Мурманской области // Минералогия техногенеза. 2018. № 19. С. 205–216.

References

1. Semkin B. V., Usov A. F., Kuretc V. I. *Osnovye elektroimpul'snogo razrusheniia materialov* [Fundamentals of electrical pulse destruction of materials]. Saint Peterburg, Nauka, 1995, 276 p. (In Russ.).
2. Patent na poleznuuiu model 208969 U1 [Utility model patent 208969 U1]. Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V. Generator impul'snykh tokov i napriazhenii dlia promyshlennoi elektroimpul'snoi ustanovki [Generator of pulse currents and voltages for industrial electric pulse installation]. No. 2021118197, 22.06.2021, 25.01.2022.
3. Potokin A. S., Klimov A. A. Sravnitel'nyj analiz jeffektivnosti jelektroimpul'snogo razrusheniija razlichnykh tipov gornyh porod Murmanskoy oblasti [Comparative analysis of the efficiency of electric pulse destruction of various types of rocks of the Murmansk region]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, no. 7–19, pp. 92–97. (In Russ.).
4. Potokin A. S. Effectiveness evaluating of the use electric pulse comminution method in combined technology of slag dump copper-nickel production refining. *IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress*, 2019, pp. 2963–2968.
5. Svetlov A. V. Razrabotka metodov obogashcheniia dlia slozhnykh objektov tvetnoi metallurgii Mooremanskoi oblasti [Development of enrichment methods for complex non-ferrous metallurgy facilities in the Murmansk region]. *Mineralogiia tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis], 2018, no. 19, pp. 205–216. (In Russ.).

Информация об авторах

А. С. Потокин — научный сотрудник ГоИ КНЦ РАН, генеральный директор ООО «ТЕХЭДМ»;

А. А. Климов — младший научный сотрудник;

В. В. Колобов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

A. S. Potokin — Researcher of the Mining Institute of KSC RAS, General Director of LLC “TEHEDM”;

A. A. Klimov — Junior Researcher;

V. V. Kolobov — PhD (Engineering), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022, одобрена после рецензирования 20.09.2022, принята к публикации 08.10.2022.

The article was submitted 15.09.2022, approved after reviewing 20.09.2022, accepted for publication 08.10.2022.

