Том 31, №1, 2025

ISSN 2782-6724

Глобальная энергия

Санкт-Петербург

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Александров М.Л., член-корр. РАН, Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, Москва, Российская Федерация;
Клименко А.В., академик РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», НИТУ «МИСиС», Москва, Российская Федерация;
Костюк В.В., академик РАН, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация;
Лагарьков А.Н., академик РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация;
Окрепилов В.В., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Рудской А.И., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Федоров М.П., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Забоин В.Н., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Каляев И.А., д-р техн. наук, академик РАН, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация;
Колсун Михал, профессор, Технический университет, Кошице, Словакия;
Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Куколев М.И., д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Митяков А.В., д-р техн. наук, профессор, Университет Турку, Турку, Финляндия;
Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор, Бранденбургский технический университет, Бранденбург, Германия;
Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор, Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Польша;
Рамасуббу С., PhD, Директор по исследованиям BISS Division, ITW-India (P) Ltd, Бангалор, Индия;
Тендлер М.Б., PhD, ин. член РАН, KTH Royal Institute of Technology, Стокгольм, Швеция;
Титков В.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Фокин Г.А., д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Цеменко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Журнал «Глобальная Энергия» (ранее «Материаловедение. Энергетика») с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сетевое издание открытого доступа публикует статьи высокого научного уровня, освещающие передовой опыт, результаты НИР, теоретические и практические проблемы энергетики, электротехники, материаловедения и металлургии.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory», в базах данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS), DOAJ, в научной электронной библиотеке КиберЛенинка.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ЭЛ № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

Учредитель и издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Редакция журнала

О.А. Матенев – ответственный секретарь;

А.А. Кононова – компьютерная вёрстка; И.Е. Лебедева – перевод на английский язык; Ф.К.С. Бастиан – редактор.

Адрес редакции: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Тел. редакции +7 (812) 294-22-86, e-mail редакции: ntv-nauka@spbstu.ru

Дата выхода: 31.03.2025

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025

31 (1) 2025

ISSN 2782-6724

Global Energy

St. Petersburg

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great

GLOBAL ENERGY

EDITORIAL COUNCIL

Sergeev V.V. — head of the editorial council, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, corresponding member of the RAS, Russia;

Aleksandrov M.L. — corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Klimenko A.V. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Lagar'kov A.N. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Okrepilov V.A. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Rudskoy A.I. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Fedorov M.P. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia.

EDITORIAL BOARD

Sergeev V.V. — editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, corresponding member of the RAS, Russia;

Kondrat'ev S.Yu. — deputy editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Aksenov L.B. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Bashkarev A.Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Borovkov A.I. — PhD in Technical Sciences, Vice Rector for Digital Transformation of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Gordeev S.K. — Doctor of Technical Sciences, prof. CNIIM, Russia;

Zaboin B.N. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Kayaev I.A. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Kolcun Michal — Ph.D., Technical University of Kosice, Slovak Republic;

Korovkin N.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia;

Kukolev M.I. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Mityakov A.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the University of Turku, Turku, Finland;

Michailov V.G. — Doctor of Technical Sciences, prof. BTU, Germany;

Raychik Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. Czestochova Polytecnic University, Poland;

Ramasubbu S. — PhD, Lifetime Fellow, Indian Academy of Science, Research Director BISS, ITW-India (P) Ltd, India;

Tendler M.B. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, KTH Royal Institute of Technology, Sweden;

Titkov V.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Tolochko O.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Fokin G.A. — Doctor of Technical Sciences, General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg», Russia;

Tsemenko V.N. — Doctor of Technical Sciences, Head of Chair of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Global Energy (formerly Materials Science. Power Engineering) has been published since 1995 under the scientific and methodical guidance of RAS since 1995.

Since 2002, the journal has been included in the List of leading peer-reviewed scientific journals compiled by the Higher Attestation Commission.

The online fully open-access journal focuses on the latest research in theoretical and practical aspects of power engineering, electrical engineering, materials science and metallurgy, striving to publish high-quality studies in these fields.

The journal is indexed by the following databases: VINITI Database RAS, Ulrich's Periodicals Directory, Russian Science Citation Index (RSCI), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS), DOAJ, CyberLeninka.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (ROSKOMNADZOR), Certificate ЭЛ № ФС 77-78004 issued March 27, 2020.

Editorial office

O.A. Matenev – editorial manager;

A.A. Kononova – computer layout; I.E. Lebedeva – English translation; Ph.Ch.S. Bastian – editor.

Address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

+7 (812) 294-22-86, e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Release date: 31.03.2025

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025

Содержание

Энергетика. Электротехника

Паращук Д.Ю. Органические солнечные батареи..... 7

Сысоев А.А., Иудин Д.И., Коровкин Н.В., Емельянов А.А., Жаворонков И.Ю. Численное моделирование начального импульса пробоя на стадии формирования лидера молнии..... 19

Волхов К.В., Титов Д.Е., Кудрявцев А.А., Ткачук Я.В. Натурные испытания технологии оценки состояния линейной изоляции в ПАО «Россети Московский Регион»..... 41

Рогалев А.Н., Киндра В.О., Комаров И.И., Злывко О.В., Ковалев Д.С. Разработка технологической схемы тринарной энергетической установки с минимальными выбросами вредных веществ в атмосферу..... 59

Быстров А.В., Зверев С.Г. Обратноходовой преобразователь на ключе с общим коллектором, стоком – эмиттерный истоковый повторитель..... 79

Хиат В., Беляев А.Н. Поддержание частоты энергосистемы на основе управления ветроэнергетической установкой и накопителем электроэнергии..... 88

Металлургия. Материаловедение

Ким А.Э., Мазеева А.К., Разумов Н.Г., Волокитина Е.В., Попович А.А. Структура и свойства магнитного высокоэнтропийного сплава $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$..... 102

Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б. Особенности применения полимерных композиционных материалов при обустройстве нефтегазовых месторождений Арктического пояса..... 112

Павлов А.А., Борисова М.Э., Камалов А.М., Диденко А.Л. Электрофизические свойства полиимидных материалов и композитов на их основе..... 122

Нечаев Д.В., Швецов О.В., Ермаков С.Б. Оценка деградации свайных полимерно-композитных труб под воздействием УФ-излучения, повышенной температуры и влажности..... 136

Contents

Energetics. Electrical engineering

Паращук Д.Ю. Органические солнечные батареи..... 7

Syssoev A.A., Iudin D.I., Korovkin N.V., Emelyanov A.A., Zhavoronkov I.Yu. Numerical simulation of initial breakdown pulse at the lightning leader formation stage..... 19

Volkhov K.V., Titov D.E., Kudryavtsev A.A., Tkachuk Ya.V. Field studies of the technology for assessing the condition of linear insulation in PJSC “Rosseti Moscow Region”..... 41

Rogalev A.N., Kindra V.O., Komarov I.I., Zlyvko O.V., Kovalev D.S. Development of a process flow diagram for a trinary power plant with minimal emissions of harmful substances into the atmosphere..... 59

Bystrov A.V., Zverev S.G. Flyback converter with a key acting as a common collector, drain-emitter, source follower..... 79

Khiat W., Belyaev A.N. Grid frequency support with integrated DFIG-wind turbine and energy storage system..... 88

Metallurgy. Material Science

Kim A.E., Mazeeva A.K., Razumov N.G., Volokitina E.V., Popovich A.A. Structure and properties of magnetic high-entropy alloy $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$..... 102

Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Ermakov S.B. Features of using polymer composite materials in the development of oil and gas fields in the Arctic belt..... 112

Pavlov A.A., Borisova M.E., Kamalov A.M., Didenko A.L. Electrophysical properties of polyimide materials and polyimide-based composites..... 122

Nechaev D.V., Shvetsov O.V., Ermakov S.B. Assessment of degradation of pile polymer composite pipes under the influence of UV radiation, elevated temperature and humidity..... 136

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 7–18.
Global Energy, 2025, 31 (1); 7–18.

Материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: Паращук Д.Ю. Органические солнечные батареи // 10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет: 5-й юбилейный доклад Ассоциации по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия», 2023. С. 47–58. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: https://globalenergyprize.org/ru/2023/06/15/doklad-10-proryvnyh-idej-v-jenergetike-na-sledujushhie-10-let/

Д.Ю. Паращук

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Введение. Текущая глобальная потребность в энергии соответствует мощности в 13 ТВт, при этом примерно 80% энергии производится за счет сжигания углеродсодержащего топлива. Поскольку скорость сжигания такого топлива примерно в 1000 раз превышает темп его естественного накопления, доступные ресурсы, прежде всего нефти и газа, в обозримой перспективе будут истощены. С другой стороны, солнечная энергия имеет потенциал полностью удовлетворить глобальные энергетические потребности человечества, хотя этот ресурс практически не используется. Наиболее удобный способ использования энергии солнца – ее преобразование в электричество с помощью солнечных батарей (СБ) – солнечная фотовольтаика. Под СБ понимаются единичные солнечные элементы (СЭ), размер которых не превышает 20 см, солнечные модули, состоящие из электрически соединенных СЭ, а также солнечные панели, составленные из модулей. Для удовлетворения всех энергетических потребностей РФ достаточно покрыть площадь 100х100 кв. км (=10 кв. Гм) солнечными панелями с 10% кпд. Однако текущий уровень технологий солнечной фотовольтаики не позволяет это сделать по экономическим причинам, поскольку ватт солнечного фотоэлектричества слишком дорог в сравнении с «углеродным ваттом». Тем не менее, глобальная установленная мощность солнечной фотовольтаики уже превысила 1 ТВт и показывает годовой прирост около 25% в год, при этом стоимость солнечного ватта постепенно снижается. Однако пока еще только 5% глобального потребления электрической энергии приходится на фотовольтаику.

В настоящее время подавляющая доля солнечной электроэнергии производится кремниевыми солнечными панелями, обладающими КПД выше 20% и сроком службы в десятки лет, но слишком дорогими для более масштабного применения. В связи с этим внимание во всем мире сосредоточено на поиске более дешевых альтернатив солнечному кремнию, производство которого энергозатратно и дорого, т.к. принципиально требует высоких температур и вакуума. Такой альтернативой видятся дешевые тонкопленочные (~100 нм) полупроводниковые материалы, которые, например, можно быстро наносить из растворов на большие площади, используя, в частности, имеющиеся технологии полимерной и печатной индустрии. Так, если типичный кремниевый завод может произвести 0.1 Мм^2 пластин в год, то на производство площади в 10 Гм^2 потребуется 100 лет и 1000 таких заводов. При этом 10 рулонных машин способны напечатать площадь порядка 10 Гм^2 всего лишь за один год. Кроме того, тонкопленочная фотовольтаика может быть легкой, гибкой, полупрозрачной и цветной, что дает новые возможности для ее различных применений, в частности, в авиации, космосе, сельском хозяйстве и архитектуре. Наиболее бурный рост исследований в последние 10 лет наблюдался в области органической и т.н. перовскитной фотовольтаике. Лучшие лабораторные образцы последней по кпд достигли

© Паращук Д.Ю., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

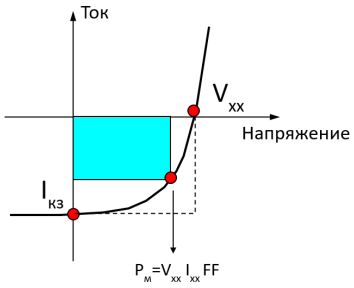


Рис. 1. Вольтамперная характеристика солнечного элемента (батареи) при освещении. Площадь закрашенного прямоугольника отвечает максимальной мощности $P_м$

уровня кремниевой фотовольтаики. Перовскитные СБ основаны на неорганических материалах со структурой перовскита, состоящих из свинца, галогенов и иногда органического соединения. Однако токсичный свинец выступает существенным экологическим фактором, сдерживающим масштабное производство перовскитных СБ. Кроме того, как органические, так и перовскитные СБ требуют качественной герметизации для их защиты от атмосферных кислорода и влаги, что удорожает стоимость солнечного модуля. В настоящей работе рассмотрены органические СБ (ОСБ).

Принципы работы солнечных элементов

В основе работы СЭ лежит фотоэлектрический эффект, состоящий в том, что при поглощении света активном слое появляются носители тока – электроны и дырки, которые собираются на электродах элемента, т.е. дырки идут на анод, а электроны двигаются на катод. В неорганических солнечных элементах такое разделение зарядов выполняют с помощью p-n или гетеропереходов. Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) СЭ при освещении показана на рис. 1. СЭ выдает максимальную электрическую мощность $P_м$ в точке максимальной мощности ВАХ, отвечающей максимуму произведения тока СЭ на напряжение на нем. Точку максимальной мощности удобно находить через безразмерный фактор заполнения (ФЗ) ВАХ, который определяют как отношение площадей двух прямоугольников: $ФЗ = P_м/(V_{xx}I_{кз})$ (рис. 1), где V_{xx} – напряжение холостого хода, $I_{кз}$ – ток короткого замыкания СЭ. Таким образом, максимальная электрическая мощность СЭ определяется произведением трех основных параметров $P_м = ФЗ\ V_{xx}I_{кз}$. Очевидно, что для достижения максимального кпд необходимо стремиться максимизировать все эти три основные параметра. ФЗ ограничен потерями зарядов на рекомбинацию и в оптимальных СЭ может превышать 90%. Максимальные $I_{кз}$ и V_{xx} для полупроводникового СЭ определяется фактически шириной запрещенной зоны (оптической щели), Δ (рис. 2), используемых полупроводниковых материалов. При этом, чем меньше Δ, тем больше поглощается фотонов, отвечающих различным длинам волн солнечного спектра и соответственно выше $I_{кз}$, но при этом меньше V_{xx}, максимальное значение которого задается величиной Δ. Поэтому для полупроводникового СЭ с одним активным слоем имеется оптимальное значение Δ, при котором достигается максимальное произведение $V_{xx}I_{кз}$, а значит и кпд СЭ. Для стандартного солнечного спектра (AM1.5G) оптимальная величина Δ отвечает ближнему ИК-диапазону, при этом такие материалы как Si и GaAs имеют практически идеальную величину Δ. Для активного слоя СЭ из полупроводника с оптимальной Δ, в котором поглощение фотона приводит к появлению электронов и дырок, максимально возможное кпд при стандартном солнечном освещении в земных условиях, т.е. для спектра AM1.5G при интенсивности излучения 100 мВт/см^2, составляет величину около 30%, называемую пределом Шокли-Куиссе.

В органических полупроводниках поглощение кванта света как правило порождает не свободные электроны и дырки, а их связанное кулоновским притяжением состояние, называемое

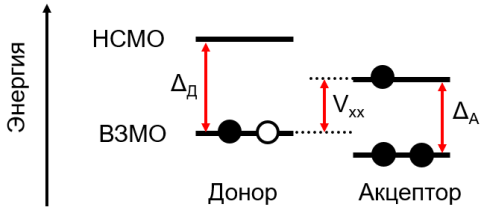


Рис. 2. Упрощенная энергетическая диаграмма, иллюстрирующая соотношение между уровнями энергий граничных орбиталей – низшей свободной и высшей заполненной молекулярными орбиталями (НСМО и ВЗМО) молекул донора и акцептора. Показано состояние с разделенными зарядами, сплошной кружок обозначает электрон, незакрашенный – дырку

экситоном. Для генерации свободных зарядов необходимо диссоциировать экситон на свободные электроны и дырки, для этого необходимо приложить энергию, отвечающую энергии связи экситона. В органических полупроводниках характерная энергия связи экситона обычно лежит в диапазоне 0.3–0.5 эВ. Из-за того, что необходима дополнительная энергия на диссоциацию экситона максимально возможный кпд ОСБ будет ниже предела Шокли-Куиссе. Для диссоциации экситона на свободные заряды в органической фотовольтаике используют гетеропереход типа II (рис. 3а) – контакт двух полупроводников. Полупроводник, на котором оказывается электрон/дырка после диссоциации экситона называют акцептором/донором электронов (рис. 2). При поглощении кванта света в одном из полупроводников рождается экситон, который мигрирует в область гетероперехода, где диссоциирует на свободные электрон и дырку. Далее электрон по фазе акцептора движется к катоду, а дырка по фазе донора – к аноду. В органических полупроводниках типичная длина диффузии экситона за время его жизни обычно составляет несколько нанометров, что намного меньше характерной длины поглощения света (десятки нанометров). В связи с этим в планарном гетеропереходе (рис. 3а) только экситоны, рожденные в пределах их длины диффузии от границы гетероперехода, имеют шанс ее достигнуть и диссоциировать. Для того, чтобы подавляющая часть экситонов диссоциировала на границе гетероперехода используют концепцию объемного гетероперехода (рис. 3б), где материалы донора и акцептора образуют композит в состоянии фазового расслоения на нанометровом масштабе. Например, в растворном методе нанесения активного слоя, оптимальную морфологию объемного гетероперехода получают путем нанесения раствора смеси донора и акцептора на подложку при специально подобранных условиях (тип растворителя, соотношение донор-акцептор и т.д.) часто с последующей постобработкой, например, путем температурного отжига или выдержкой полученной пленки в парах растворителя.

Материалы для органических солнечных батарей

ОСБ представляет собой многослойную структуру, где активный слой, обеспечивающий генерацию фотоиндуцированных электрических зарядов при освещении, заключен между вспомогательными слоями, обеспечивающими сбор фотоиндуцированных зарядов – электронов и дырок – соответственно на катоде и аноде (рис. 4). Также вспомогательные слои выполняют обычно из широкозонных материалов, тем самым они выполняют функции блокировки экситонов, т.е. «запирают» их пределах активного слоя.

В грубом приближении движение электронов/дырок в органическом полупроводнике можно представить перескоками между НСМО/ВЗМО соседних молекул акцептора/донора. Уровням НСМО и ВЗМО в терминах физики полупроводников отвечают соответственно потолок валентной зоны и дно зоны проводимости, разделенными запрещенной зоной Δ. В гетеропереходе максимально возможное V_{xx} определяется разницей ЕД(ВЗМО)–ЕА(НСМО) (рис. 2). При этом пара

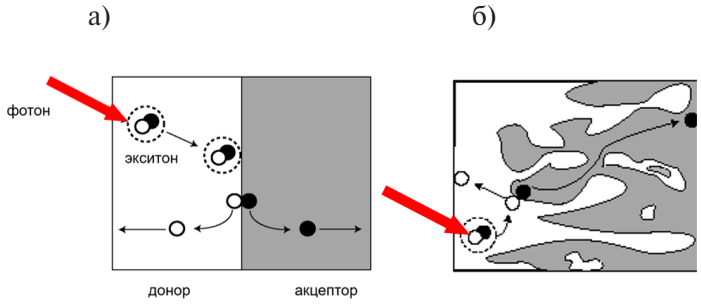


Рис. 3. Планарный и объемный гетеропереходы. В качестве примера показан экситон, фотовозбужденный в материале донора, который диффундирует к гетеропереходу (граница между донором и акцептором), где диссоциирует на свободные электроны и дырки, которые движутся соответственно по фазе акцептора к катоду и по фазе донора к аноду СЭ

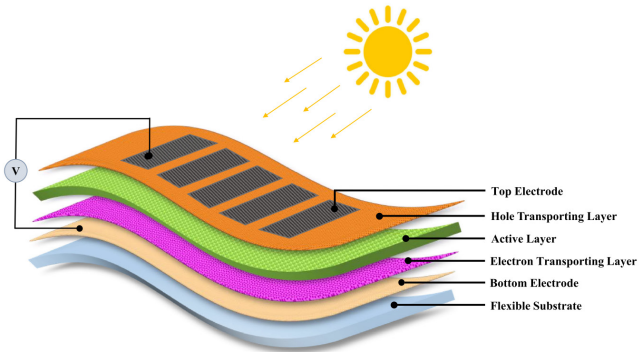


Рис. 4. Схема гибкой ОСБ (Top electrode – анод, bottom electrode – катод, hole/electron transport layer – вспомогательные слои)

материалов донор-акцептор должна обладать оптимальными разницами энергий граничных орбиталей $E_Д$(НСМО)–$E_А$(НСМО) и $E_А$(ВЗМО)–$E_Д$(ВЗМО), чтобы, с одной стороны, обеспечить эффективную диссоциацию экситона, но, с другой стороны, слишком большая разница будет уменьшать V_{xx}. В наиболее эффективных ОСБ эта разница составляет величину не более 0.5–1 эВ. Максимальный $I_{кз}$ будет тем больше, чем меньше оптическая щель Δ~E(НСМО)–E(ВЗМО). Для наиболее эффективных ОСБ оптимальная Δ для донора и акцептора составляет величину около 1.4 эВ.

Исходя из указанных особенностей работы гетеропереходных ОСБ, для их активного слоя необходимы органические полупроводниковые материалы со следующими свойствами: максимальное оптическое поглощение, чтобы толщина активного слоя составляла десятки нанометров; минимально возможная энергия связи экситона для уменьшения энергетических потерь на его диссоциацию, максимальная длина диффузии экситона, достаточная подвижность электронов по фазе акцептора и дырок по фазе донора. Кроме того, пленки для ОСБ должны быть термо-, фото- и химически стабильны в течение ожидаемого срока службы ОСБ.

Долгие годы в органической фотовольтаике в качестве акцептора использовали в основном фуллерены C_{60}, C_{70} и их растворимые производные (например, PCBM на рис. 5). Однако фуллерены имеют малое оптическое поглощение, кроме того, их НСМО слишком низка, что обеспечивает эффективную диссоциацию экситонов, но приводит к ощутимым потерям в V_{xx}. В результате максимальный КПД ОСБ с фуллереновыми акцепторами немного превышал 10%. Примерно 10 лет назад началась активная разработка и исследование нефуллереновых акцепторов, которые

позволили практически удвоить кпд ОСБ и приблизить его к 20%. В настоящее время китайские исследователи, благодаря массированным и во многом эмпирическим поисковым исследованиям, выступают мировыми лидерами по разработке нефуллереновых акцепторов, а также донорных материалов для высокоэффективных ОСБ (рис. 5).

В области ОСБ конкурируют два подхода к формированию активного и вспомогательных слоев – жидкофазный («мокрый»), т.е. из растворов, и парофазный («сухой») – обычно путем осаждения в вакуумной камере терморезистивным методом. Для «мокрого» нанесения материалы должны иметь приемлемую растворимость (обычно не менее 1 г/л), этим способом можно наносить как низкомолекулярные материалы, так и полимеры. Для «сухого» нанесения подходят только низкомолекулярные материалы с молекулярной массой не более 1000, которые допускают возгонку в вакууме при температурах не выше 500–600 °С.

Также конкурируют между собой т.н. малые молекулы и полимеры, т.е. низко- и высокомолекулярные соединения. К преимуществам полимеров относят отличные пленкообразующие свойства, которые как правило сложнее достичь с низкомолекулярными соединениями. К недостаткам полимеров относят низкий уровень воспроизводимости при синтезе, наличие неконтролируемых примесей, в частности остатков катализаторов и т.д. С другой стороны, низкомолекулярные соединения допускают намного лучшую химическую чистоту, полный контроль молекулярной структуры и высокую воспроизводимость, а также возможность высоковакуумной глубокой очистки для материалов, которые можно испарить в вакууме. При этом наиболее высокие КПД ОСБ получены на основе жидкофазных методов с активным слоем на основе объемных гетеропереходов, состоящим из полимерного донора и низкомолекулярного акцептора (рис. 5). Более того, используют тройные и четверные смеси донорных и акцепторных материалов, что позволяет достичь рекордных значений кпд (см. ниже).

В настоящее время исследованы многие тысячи материалов для активного слоя ОСБ. Характерные примеры молекулярных структур донорных и акцепторных материалов для наиболее эффективных ОСБ приведены на рис. 5.

КПД

Задача корректного измерения кпд СЭ является сама по себе непростой задачей. Поэтому наиболее надежные данные по КПД получает в специальных сертификационных центрах, где измерения проводят при стандартных условиях солнечного освещения со спектром, максимально приближенным к стандарту AM1.5G и заданной температуре СБ. Сертифицированные значения кпд лучших исследовательских образцов ОСБ приведены на рис. 6. Как правило, для многих типов образцов СБ наивысшие КПД получают на СЭ с маленькой рабочей площадью, существенно меньшей 1 см^2. Для ОСБ рекордное сертифицированное значение КПД составляет 19,2%, полученное для СЭ с рабочей площадью около 0,03 см^2. Активный слой этих рекордных по кпд образцов состоял из тройного композита, включающего два полимерных донора и низкомолекулярный нефуллереновый акцептора. Однако кпд модулей, составленных из многих последовательно соединенных солнечных элементов, всегда ниже рекордных величин, полученных на единичных солнечных элементах небольшой площади. Рекордное сертифицированное значение кпд для субмодуля площадью 19 см^2, выполненного на основе четырехкомпонентного полимерного композита с тремя акцепторами, достигает 15,7%. Наивысший сертифицированное значение кпд для ОСБ в виде модуля площадью около 1,5 м^2 составляет 13,1%. Следует отметить, что обычно рекордные по кпд ОСБ выполнены на твердых подложках, а переход на гибкие подложки зачастую приводит к снижению кпд. Таким образом, достигнутые кпд ОСБ в принципе уже достаточны для самых разнообразных практических применений. При этом не просматривается каких-либо фундаментальных ограничений для достижения кпд ОСБ с одним гетеропереходом выше 20%. Однако срок службы рекордных по кпд ОСБ обычно

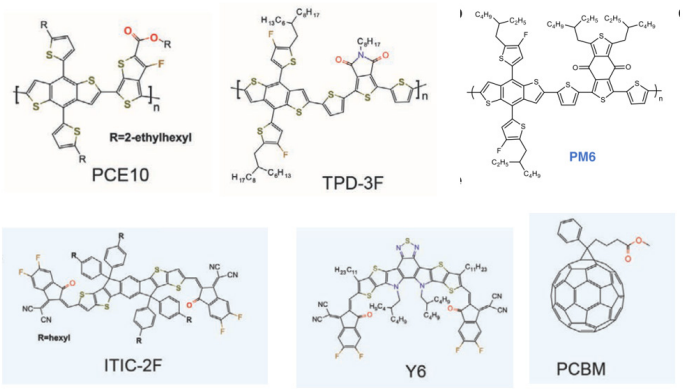


Рис. 5. Примеры материалов активного слоя наиболее эффективных ОСБ. Сверху приведены примеры полимерных донорных материалов, снизу – примеры низкомолекулярных акцепторных материалов

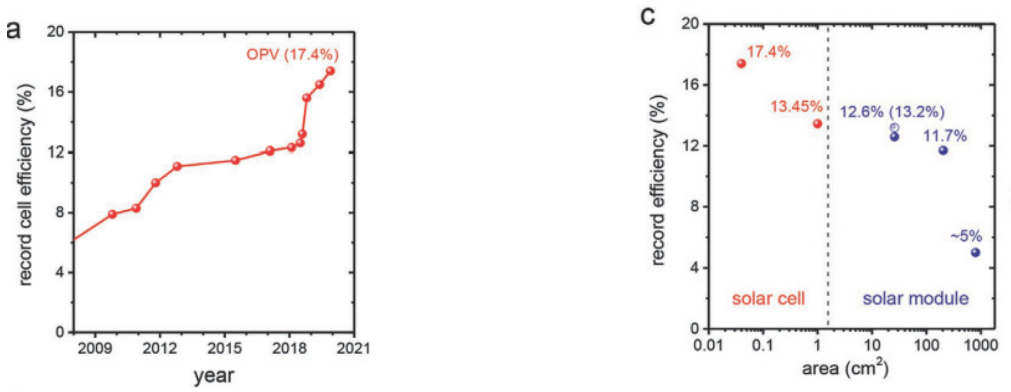


Рис. 6. Сертифицированные значения кпд лучших исследовательских образцов ОСБ

слишком краткий, поскольку вся процедура их оптимизации (материалов и параметров рабочих слоев, материалов электродов и т.д.) сфокусирована именно на достижении наивысшего кпд без должного внимания вопросам стабильности.

Таким образом задача повышения стабильности ОСБ в рабочих условиях и при хранении, особенно для ОСБ на гибких подложках, выступает на первый план.

Стабильность

Стабильность выступает одним из наиболее узких мест ОСБ, именно она и определяет срок их службы, который обычно определяется как интервал времени, в течение которого КПД уменьшилось до 80% от исходного, T80. Органические материалы в целом склонны к деградации под действием различных факторов, в частности света, особенно УФ-диапазона, повышенной температуры, атмосферных влаги и кислорода. Поэтому для практического использования ОСБ необходимо их герметизировать для защиты от воздействия окружающей атмосферы и как правило УФ-излучения. Кроме того, срок службы ОСБ также существенно зависит от стабильности вспомогательных слоев и электродов, а также интерфейсов между активным слоем, вспомогательными слоями и электродами.

Деградационные процессы в ОСБ очень разнообразны, они могут происходить как при освещении, так и в темновом режиме. Более того, они протекают по-разному в различных режимах работы СБ, в частности в режимах короткого замыкания и холостого хода, а также в точке

максимальной мощности (рис. 1). Последняя очевидно наиболее близка к эксплуатационному режиму СБ. Процессы деградации включают в себя, в частности, нестабильность морфологии донорно-акцепторного композита, фото и термодеградацию интерфейсов и слоев, причем некоторые из них могут быть обратимы. Например, в темное время суток может происходить частичное восстановление кпд СБ, которое уменьшилось во время дневного освещения.

Вместе с тем, среди органических полупроводников есть весьма стабильные, на основе которых могут быть выполнены ОСБ с приемлемыми значениями кпд. Так, недавно были приготовлены высокостабильные образцы ОСБ, приготовленные как из паровой фазы («сухие»), так из раствора («мокрые»), которые потом подвергали ускоренному старению, т.е. освещали светом с интенсивностью, намного превышающей естественную солнечную. «Сухие» образцы с исходным кпд 6,7%, где в качестве донора использовали полициклический углеводород, а в качестве акцептора – фуллерен С70, подвергали непрерывному светодиодному освещению повышенной интенсивности, отвечающему интенсивности до 37 «солнц», в течении 68 дней. Путем экстраполяции полученных данных на стандартные условия солнечного освещения авторы пришли к выводу, что срок службы ОСБ в терминах Т80 при качественной герметизации и в условиях естественного солнечного освещения по оптимистическим оценкам достигает 27 000 лет (!), а по наиболее консервативной оценке составляет около 120 лет. Герметизированные «мокрые» образцы с исходным кпд около 10% на основе полимерного донора и нефуллереннового акцептора испытывали аналогичным образом. В результате экстраполяции на естественные условия солнечного освещения был предсказан их срок службы Т80=30 лет в условиях естественного солнечного освещения. Таким образом, при надлежащей герметизации ОСБ могут быть использованы во многих практических применениях.

Стоимость

Стоимость производства ОСБ для них выступает одним из ключевых факторов, определяющих возможности их коммерциализации. Поскольку масштабного производства ОСБ пока нет, весьма сложно спрогнозировать стоимость будущей технологии ОСБ.

Оценки показывают, что 60-80% стоимости модулей ОСБ составляет производство материалов (синтез и очистка) для них, а именно, компонентов активного слоя, а также материалов вспомогательных слоев, электродов, подложек и герметизации. Наиболее дорогим является синтез и очистка материалов активных слоев ОСБ (рис. 5), поскольку требуется многостадийный синтез, требующий соответствующих прекурсоров, затрат растворителей и многократных операций по очистке. Поэтому наибольшее внимание в ближайшие годы будет уделяться разработке более дешевых в производстве материалов активного слоя.

При этом стоимость самой технологии производства ОСБ – «мокрой» или «сухой» — не является пока ключевым фактором. Хотя стоимость «мокрой» технологии может быть намного ниже, чем «сухой» при больших масштабах производства, поскольку для нанесения пленок можно адаптировать имеющиеся рулонные машины, разработанные для полиграфической и полимерной промышленности. Традиционным аргументом против «сухой» технологии служит то, что она требует вакуума и повышенных температур, что влечет за собой увеличение затрат энергии на производство и соответственно рост себестоимости ОСБ. Также «сухую» технологию сложнее совместить с рулонной. С другой стороны, «сухая» технология десятилетиями отработана в микроэлектронике и успешно применяется для производства органических светодиодов и экранов на их основе. При этом «сухая» технология позволяет намного лучше контролировать чистоту материалов и параметры слоев многослойной структуры ОСБ. Поэтому в настоящее время нет консенсуса, какая технология будет предпочтительной.

Тем не менее, оценки показывают, что стоимость органического электричества вполне может быть ниже кремниевого.

Перспективные области применения

В ближайшие годы ОСБ не достигнут необходимой степени зрелости для конкуренции с кремниевыми СБ для промышленного производства электроэнергии. При этом ожидается, что будут активно развиваться нишевые применения, где ОСБ имеют весомые преимущества перед другими типами СБ, а именно за счет гибкости, малого веса, полупрозрачности, возможности получения различных цветов солнечных панелей. Потенциал коммерциализации ОСБ в основном определяется тремя факторами: кпд, срок службы и стоимость (рис. 7). Также немаловажны такие факторы, как экологическая безопасность на всем жизненном цикле СБ: производство самих модулей и материалов для них, эксплуатация и утилизация отработанных модулей. Кроме того, существенным параметром выступает энергетический фактор, определяемый как временной интервал, в течение которого модуль отдаст затраченную на его производство и разработку энергию (energy payback time). Основные нишевые применения, которые видятся наиболее перспективными в ближайшие 10 лет рассмотрены ниже.

Фотовольтаика в помещениях (in-door)

В помещениях – офисах, квартирах, складах, цехах, торговых центрах и т.д. – как правило имеется искусственное и(или) естественное освещение. Характерный уровень интенсивности такого освещения более чем в 100 раз ниже в сравнении с прямым солнечным светом, но, тем не менее, свет в помещении может быть использован для работы СБ, питающих разнообразную электронику с низким энергопотреблением (на уровне ~10 мкВт), например, сенсоры и датчики, гаджеты, видеокамеры, радио идентификационные метки (RFID), а также устройства интернета вещей (IoT). Рынок устройств фотовольтаики, предназначенных для работы в помещениях, показывает ежегодный прирост более 30% и ожидается, что он достигнет 850 млн долл. в 2023 г.

Пока ОСБ еще не вышли на рынок фотовольтаики для помещений, но имеют высокий потенциал. Во-первых, путем выбора материалов активного слоя спектр фоточувствительности ОСБ может быть сравнительно легко подстроен под спектр искусственного освещения, в частности от светодиодов и флуоресцентных ламп, который заметно отличается от спектра солнечного света. В настоящее время продемонстрированы лабораторные образцы различных типов ОСБ с кпд в диапазоне 20–30%, что превышает кпд кремниевых СБ при аналогичных условиях искусственного освещения. Отметим, что предельный кпд ОСБ для работы на искусственном свете может достигать 60%, что существенно выше предела Шокли-Куиссе, рассчитанного для условий прямого солнечного освещения. Во-вторых, условия эксплуатации СБ в помещениях как правило намного менее жесткие, чем при работе на открытом воздухе, что делают менее острыми проблемы стабильности ОСБ. При этом более высокой стабильности ОСБ при работе в помещениях способствует сравнительно низкий уровень освещения, отсутствие перепадов температур, уровня влажности и т.д.

Интеграция в здания

Различные здания по всему миру потребляют около 40% глобально производимого электричества. При этом общую площадь фасадов, крыш и окон зданий оценивают в 230 млрд м^2. Архитектурно-интегрированная фотовольтаика нацелена на использование этих площадей для выработки электроэнергии при солнечном освещении. Использование таких площадей под СБ могло бы дать около 11% глобального производства электричества к 2050 г. При этом архитектурно-интегрированная фотовольтаика не требует выделения дополнительных территорий, что необходимо для работы солнечных электростанций. Кроме того, покрытые солнечными панелями внешние площади зданий могут улучшить их шумовую и термоизоляцию, а также электромагнитную защиту. В настоящее время рынок архитектурно-интегрированной фотовольтаики на 80% состоит из панелей на основе монокристаллического кремния, устанавливаемых на крыши

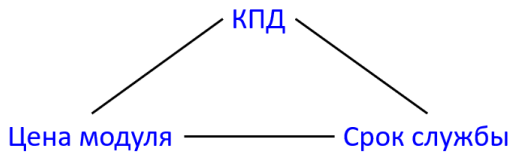


Рис. 7. Ключевые факторы, определяющие перспективы коммерциализации СБ

зданий. К концу 2020 г. по всему миру таких солнечных панелей установлено на общую мощность 9 ГВт. Вместе с тем рынок архитектурно интегрированной фотовольтаики пока составляет около 5% всего рынка фотовольтаики, но ожидается его ежегодный рост на более чем 20%, и он может достичь почти 90 мрлд долл к 2030 г.

ОСБ перспективны для архитектурно-интегрированной фотовольтаики в сравнении с традиционными кремниевыми солнечными панелями за счет их гибкости, малого веса, полупрозрачности и возможности получать различные цветовые оттенки. Кроме того, ОСБ более эффективно преобразуют рассеянное и падающее под углом солнечное излучение. Так, кпд солнечных панелей максимален при нормальном падении и существенно падает с увеличением угла падения света. Солнечные панели, установленные на крышах, обычно не имеют поворотной системы слежения за Солнцем, поэтому значительную часть времени солнечный свет падает не в оптимальных условиях, т.е. при нормальном падении. Недавние сравнительные натурные испытания кремниевых и гибких органических солнечных модулей, установленных наклонно (под углом 45°) и вертикально (под углом 90°), показали, что нормированное на максимальное значение кпд ОСБ может быть до 30% выше, чем кпд кремниевых. Также перспективным направлением представляется интеграция в окна зданий полупрозрачных ОСБ со спектром поглощения в ближнем ИК-диапазоне. В таком случае наличие ОСБ не будет визуально заметным. При этом оконные стекла могут служить отличной герметичной защитой от влияния окружающей атмосферы, что будет способствовать длительному сроку службы ОСБ.

ОСБ в области архитектурно-интегрированной фотовольтаики делают только первые шаги. Так, компания Heliatek в последние несколько лет инсталлирует гибкие модули с КПД до 8%. К настоящему времени Heliatek установил модули ОСБ общей площадью более 1500 м^2. ОСБ изготовлены по «сухой» рулонной технологии и покрыты с двух сторон герметизирующим пластиком, на который приходится почти вся толщина модуля, составляющая 2 мм. Модули имеют удельный вес менее 2 кг/м^2 и наклеиваются на крыши и фасады зданий с помощью скотча. Данные модули отрабатывают вложенную в их производство энергию менее, чем за полгода, что существенно меньше, чем для всех других типов СБ. Особенно перспективны такие модули для применения в зданиях, срок службы которых менее 20 лет, например, склады, легкие ангары и т.д.

Космос

Еще одним перспективным направлением развития органической фотовольтаики выступает космос по следующим причинам. Во-первых, тонкопленочные СБ имеют высокие энергомассовые параметры батарей в терминах удельной мощности (Вт/кг), что исключительно важно с точки зрения их доставки в космос. Во-вторых, широкоформатные тонкопленочные ОСБ, выполненные на гибких подложках, в частности, полимерных, могут быть доставлены в сложенном виде и развернуты в виде надувных конструкций или за счет центробежных сил. В-третьих, в космосе нет главных «врагов» стабильности ОСБ — кислорода и воды. Однако космос насыщен радиацией в виде заряженных частиц (протонов, электронов, α-частиц и различных ионов), а также электромагнитным излучением УФ, рентгеновского и γ-диапазонов, так что радиация может служить ключевым источником деградации СБ.

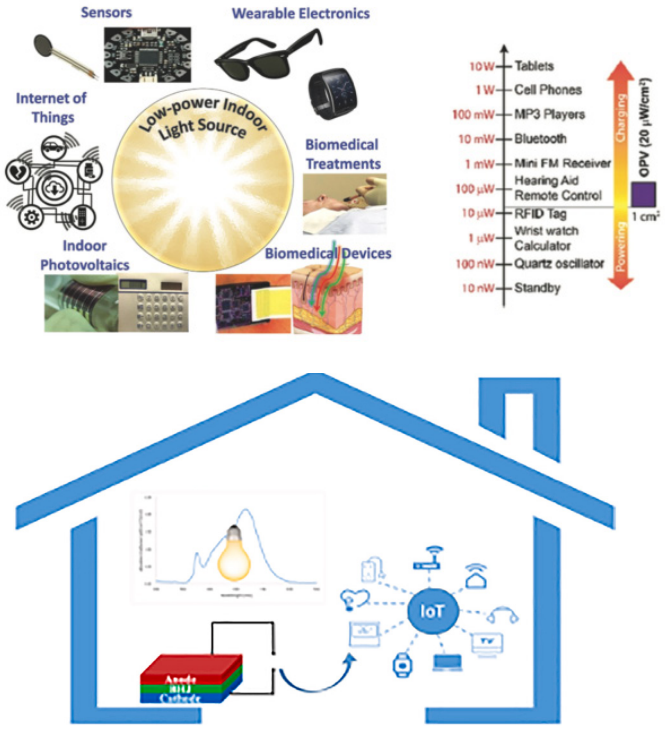


Рис. 8. Применения СБ внутри помещений

Кремниевые СБ имеют удельную мощность не более 1 Вт/г, а многокаскадные СБ на основе полупроводников группы А3-В5, которым принадлежат рекордные кпд среди всех известных типов СБ, превышают 3 Вт/г, в частности для трехкаскадного элемента на основе GaInP/GaAs/GaInAs. При этом неорганические СБ как правило хрупкие и жесткие. При исполнении ОСБ на гибких подложках их удельная мощность может быть на порядок величины выше, так, недавно была достигнута рекордная удельная мощность 33 Вт/г, при этом основной вклад в вес ОСБ дает подложка и защитные слои.

Существенно, что радиационная стойкость ОСБ может быть значительно выше, чем у неорганических СБ в силу следующих причин. Во-первых, ОСБ состоят из легких элементов, в основном из углерода и водорода, которые имеют малое сечение поглощение рентгеновского и γ-излучения по сравнению с более тяжелыми элементами, из которых состоят неорганические СБ (кремний, элементы III и V групп). Во-вторых, активный слой ОСБ представляет собой обычно аморфную пленку, поэтому радиация, приводящая к дефектам кристаллической решетки и быстрой деградации неорганических СБ, гораздо менее существенна для ОСБ. Наконец, π-сопряженная система, придающая полупроводниковые свойства органическим материалам, также способствует их радиационной стойкости. На высокую радиационную стойкость π-сопряженных соединений указывает то, что ароматические соединения составляют основную долю органического вещества в космическом пространстве, кроме того, около 15% космического углерода существует в виде полициклических углеводородов. Известно, что традиционные (не полупроводниковые) полимеры с ароматическими мономерными группами имеют на порядки величины более высокую радиационную стойкость, чем полимеры с насыщенными связями, как например, полиэтилен. Такие полимеры могут быть использованы в качестве подложек и защитных слоев для ОСБ. Недавние исследования пленок полициклических углеводородов на Международной космической станции показали их высокую стойкость к радиации и солнечному излучению в условиях околоземного космоса.

В последние годы выполнен ряд испытаний образцов ОСБ на аэростатах, поднимающихся на высоты в несколько десятков километров и ракете, достигшей высоты 240 км. Эти испытания, в ходе которых измеряли кпд образцов ОСБ, показали, что в целом ОСБ хорошо переносят нагрузки в виде перепадов температур, вакуума, радиации и сильно меняющихся условий освещения. Поэтому, представляется, что дальнейшие исследования ОСБ в условиях космоса или в земных условиях, моделирующих космические, вполне способны привести к массовому проникновению ОСБ на низкие околоземные орбиты, а в перспективе возможно и к применению ОСБ на более высоких околоземных орбитах и в более дальнем космосе.

Заключение

Таким образом, значения кпд лабораторных образцов ОСБ уже достигли уровня, вполне достаточного для большого числа разнообразных практических применений, но наиболее узкими местами ОСБ остаются их недостаточный срок службы и высокая стоимость. При этом проведенные исследования по методике ускоренного старения показывают, что при качественной герметизации от атмосферных кислорода и воды срок службы ОСБ может достигать десятков лет. Высокая стоимость ОСБ прежде всего связана с дороговизной материалов для активного и вспомогательных слоев для них. Поэтому усилия исследователей будут направлены не поиск более простых синтетических методик для получения материалов для ОСБ. В связи с этим ожидается, что в ближайшие годы прежде всего будут развиваться нишевые применения ОСБ, в частности, фотовольтаика внутри помещений, архитектурно-интегрированная и космическая фотовольтаика.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Паращук Д.Ю., Кокорин А.И.** Современные фотоэлектрические и фотохимические методы преобразования солнечной энергии, Росс. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), v. 52, № 6, 107–117 (2008).

[2] **Shockley W., Queisser H.J.** Detailed Balance Limit of Efficiency of P-N Junction Solar Cells, Journal of Applied Physics, v. 32, № 3, 510–519 (1961).

[3] **Труханов В.А., Паращук Д.Ю.** Нефуллереновые акцепторы для органических солнечных фотоэлементов, Высокомолекулярные соединения, серия С, v. 56, № 1, 76–88 (2014).

[4] **Yan C., Barlow S., Wang Z., Yan H., Jen A.K.Y., Marder S.R., Zhan X.** Non-fullerene acceptors for organic solar cells, Nature Reviews Materials, v. 3, № 3, 18003 (2018), DOI: 10.1038/natrevmats.2018.3

[5] **Zhu L., Zhang M., Zhou G., Hao T., Xu J., Wang J., Qiu C., Prine N., Ali J., Feng W., Gu X., Ma Z., Tang Z., Zhu H., Ying L., Zhang Y., Liu F.** Efficient Organic Solar Cell with 16.88% Efficiency Enabled by Refined Acceptor Crystallization and Morphology with Improved Charge Transfer and Transport Properties, Adv. Energy Mater., v. 10, № 18, 1904234 (2020), doi: https://doi.org/10.1002/aenm.201904234

[6] **Liu Q., Jiang Y., Jin K., Qin J., Xu J., Li W., Xiong J., Liu J., Xiao Z., Sun K., Yang S., Zhang X., Ding L.** 18% Efficiency organic solar cells, Science Bulletin, v. 65, № 4, 272–275 (2020), DOI: https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.01.001

[7] **Green M.A., Dunlop E.D., Yoshita M., Kopidakis N., Bothe K., Siefer G., Hao X.** Solar cell efficiency tables (version 62), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 31, № 7, 651–663 (2023), DOI: https://doi.org/10.1002/pip.3726

[8] **Zhu L., Zhang M., Xu J., Li C., Yan J., Zhou G., Zhong W., Hao T., Song J., Xue X., Zhou Z., Zeng R., Zhu H., Chen C.-C., MacKenzie R.C.I., Zou Y., Nelson J., Zhang Y., Sun Y., Liu F.** Single-junction organic solar cells with over 19% efficiency enabled by a refined double-fibril network morphology, Nat. Mater., №(2022), DOI: 10.1038/s41563-022-01244-y

[9] **Sosorev A.Y., Godovsky D.Y., Paraschuk D.Y.** Hot kinetic model as a guide to improve organic photovoltaic materials, Physical Chemistry Chemical Physics, v. 20, № 5, 3658–3671 (2018), DOI: 10.1039/C7CP06158G

[10] **Brabec C.J., Distler A., Du X.Y., Egelhaaf H.J., Hauch J., Heumueller T., Li N.** Material Strategies to Accelerate OPV Technology Toward a GW Technology, Adv. Energy Mater., v. 10, № 43, 10 (2020), DOI: 10.1002/aenm.202001864

[11] **Burlingame Q., Huang X., Liu X., Jeong C., Coburn C., Forrest S.R.** Intrinsically stable organic solar cells under high-intensity illumination, Nature, v. 573, № 7774, 394–397 (2019), DOI: 10.1038/s41586-019-1544-1

[12] **Li Y., Huang X., Ding K., Sheriff H.K.M., Ye L., Liu H., Li C.-Z., Ade H., Forrest S.R.** Non-fullerene acceptor organic photovoltaics with intrinsic operational lifetimes over 30 years, Nat. Commun., v. 12, № 1, 5419 (2021), DOI: 10.1038/s41467-021-25718-w

[13] **Guo J., Min J.** A Cost Analysis of Fully Solution-Processed ITO-Free Organic Solar Modules, Adv. Energy Mater., v. 9, № 3, 1802521 (2019), DOI: https://doi.org/10.1002/aenm.201802521

[14] **Mathews I., Kantareddy S.N., Buonassisi T., Peters I.M.** Technology and Market Perspective for Indoor Photovoltaic Cells, Joule, v. 3, № 6, 1415–1426 (2019), DOI: https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.03.026

[15] **Xie L., Song W., Ge J., Tang B., Zhang X., Wu T., Ge Z.** Recent progress of organic photovoltaics for indoor energy harvesting, Nano Energy, v. 82, № 105770 (2021), DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105770

[16] **Srivishnu K.S., Rajesh M.N., Prasanthkumar S., Giribabu L.** Photovoltaics for indoor applications: Progress, challenges and perspectives, Solar Energy, v. 264, № 112057 (2023), DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112057

[17] **Feroze S., Distler A., Forberich K., Ahmed Channa I., Doll B., Brabec C.J., Egelhaaf H.-J.** Comparative analysis of outdoor energy harvest of organic and silicon solar modules for applications in BIPV systems, Solar Energy, v. 263, № 111894 (2023), DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111894

[18] "https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-building-integrated-photovoltaics-bipv-market" (2024), retrieved https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-building-integrated-photovoltaics-bipv-market

[19] **Xiong S., Fukuda K., Lee S., Nakano K., Dong X., Yokota T., Tajima K., Zhou Y., Someya T.** Ultrathin and Efficient Organic Photovoltaics with Enhanced Air Stability by Suppression of Zinc Element Diffusion, Advanced Science, v. 9, № 8, 2105288 (2022), DOI: https://doi.org/10.1002/advs.202105288

[20] **Bryson K.L., Elsaesser A., Foing B.H., Goreva Y., Peeters Z., Ricco A.J., Salama F.** First results of the ORGANIC experiment on EXPOSE-R on the ISS, International Journal of Astrobiology, v. 14, № 1, 55–66 (2014), DOI: 10.1017/S1473550414000597

[21] **Cardinaletti I., Vangerven T., Nagels S., Cornelissen R., Schreurs D., Hruby J., Vodnik J., Devisscher D., Kesters J., D'Haen J., Franquet A., Spampinato V., Conard T., Maes W., Deferme W., Manca J.V.** Organic and perovskite solar cells for space applications, Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 182, № 121–127 (2018), DOI: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.03.024

[22] **Xu Z., Xu G., Luo Q., Han Y., Tang Y., Miao Y., Li Y., Qin J., Guo J., Zha W., Gong C., Lu K., Zhang J., Wei Z., Cai R., Yang Y., Li Z., Ma C.-Q.** In situ performance and stability tests of large-area flexible polymer solar cells in the 35-km stratospheric environment, National Science Review, v. 10, № 4, (2022), DOI: 10.1093/nsr/nwac285

[23] **Reb L.K., Böhmer M., Predeschly B., Grott S., Weindl C.L., Ivandekic G.I., Guo R., Dreißigacker C., Gernhäuser R., Meyer A., Müller-Buschbaum P.** Perovskite and Organic Solar Cells on a Rocket Flight, Joule, v. 4, № 9, 1880–1892 (2020), DOI: 10.1016/j.joule.2020.07.004

[24] **Reb L.K., Böhmer M., Predeschly B., Grott S., Weindl C.L., Ivandekic G.I., Guo R., Spanier L.V., Schwartzkopf M., Chumakov A., Dreißigacker C., Gernhäuser R., Roth S.V., Meyer A., Müller-Buschbaum P.** Space- and Post-Flight Characterizations of Perovskite and Organic Solar Cells, Solar RRL, v. 7, № 9, 2300043 (2023), DOI: https://doi.org/10.1002/solr.202300043

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 19–40.
Global Energy, 2025, 31 (1); 19–40.

Энергетика. Электротехника
Energetics. Electrical engineering

Научная статья
УДК 537.52+53.01+537.87
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31102

А.А. Сысоев[1,2] ✉ , *Д.И. Иудин*[1,2], *Н.В. Коровкин*[1,3], *А.А. Емельянов*[1], *И.Ю. Жаворонков*[1]

[1] Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия;

[2] Приволжский исследовательский медицинский университет (ПИМУ), Нижний Новгород, Россия;

[3] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉ asysoev@ipfran.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ПРОБОЯ НА СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИДЕРА МОЛНИИ

Аннотация. В работе представлен новый метод численного моделирования специфической формы внутриоблачной молнии, называемой «начальные импульсы пробоя» (НИП). Они проявляются в виде серии всплесков тока с амплитудами от единиц до нескольких десятков (в некоторых случаях – сотен) тысяч ампер, предшествующей формированию самоподдерживающегося лидера молнии. Предлагаемый подход объединяет в себе элементы моделей, опирающихся на парадигму передающей линии и традиционно используемых для описания главной стадии молнии, и стохастических электростатических моделей, применяемых для симуляции эволюции трехмерного древа молнии. Модель обладает относительно высоким пространственно-временным разрешением, учитывает термодинамику разрядных каналов и описывает формирование чехла заряда лидера за счет токов утечки с поверхности тонкого лидерного канала. Она воспроизводит ряд последовательных процессов, начиная с появления в грозовом облаке первых стримерных каналов и заканчивая формированием хорошо проводящего лидера молнии длиной в несколько сотен метров. Результаты моделирования хорошо согласуются с измеряемыми параметрами НИП и указывают на то, что их появление может быть результатом формирования так называемого начального лидера молнии, которое сопровождается быстрым переходом стримерной плазмы в лидерную. Возникающий при этом интенсивный всплеск тока объясняется резкой зависимостью равновесной проводимости горячей лидерной плазмы от ее температуры. Представлено сравнение предложенного численного метода с альтернативными моделями НИП. Результаты работы важны для лучшего понимания процесса инициации молнии, механизм которого остается главной нерешенной проблемой физики атмосферного электричества.

Ключевые слова: начальные импульсы пробоя, начальный лидер молнии, инициация молнии, внутриоблачный разряд, стримеры, лидеры, численное моделирование.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Моделирование мощнейших природных источников электромагнитного излучения в атмосфере Земли» (Соглашение № 23-21-00057, https://rscf.ru/project/23-21-00057/).

© Сысоев А.А., Иудин Д.И., Коровкин Н.В., и др., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Для цитирования:

Сысоев А.А., Иудин Д.И., Коровкин Н.В., и др. Численное моделирование начального импульса пробоя на стадии формирования лидера молнии // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 19–40. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31102

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31102

A.A. Syssoev[1,2] ✉ , *D.I. Iudin*[1,2], *N.V. Korovkin*[1,3], *A.A. Emelyanov*[1], *I.Yu. Zhavoronkov*[1]

[1] Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russia;

[2] Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russia;

[3] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ asysoev@ipfran.ru

NUMERICAL SIMULATION OF INITIAL BREAKDOWN PULSE AT THE LIGHTNING LEADER FORMATION STAGE

Abstract. The study presents a new method for numerical simulation of a specific form of intracloud lightning called Initial Breakdown Pulses (IBPs). They manifest themselves as a series of current surges with amplitudes ranging from units to several tens (in some cases hundreds) of thousands of amperes preceding a self-sustaining lightning leader formation. The proposed approach combines the elements of transmission line models, traditionally used to describe the main stage of lightning, and stochastic electrostatic models used to simulate the development of a three-dimensional lightning tree. It has a relatively high spatio-temporal resolution, takes into account discharge channels thermodynamics, and describes the leader channel sheath formation due to the leakage currents from the surface of a thin leader channel. The model reproduces a number of sequential processes occurring in a thundercloud, starting with the appearance of first streamer segments and ending with the formation of a well-conducting several hundred meters long lightning leader. Simulation results are in good agreement with the measured IBPs parameters. They indicate that IBPs may result from the so-called initial lightning leader formation which is accompanied with a rapid transition of the streamer plasma into the leader one. The resulting intense current surge is explained by a sharp dependence of equilibrium conductivity of hot leader plasma on its temperature. A comparison of the proposed numerical method with alternative IBPs models is presented. The results of the study are important for better understanding of the lightning initiation process, the mechanism of which remains the main unsolved problem of the physics of atmospheric electricity.

Keywords: initial breakdown pulses, initial leader, lightning initiation, intracloud lightning, streamers, leaders, numerical simulation.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00057 “Simulation of the most powerful natural sources of electromagnetic radiation in the Earth's atmosphere”. Available online: https://rscf.ru/project/23-21-00057/.

Citation:

Syssoev A.A., Iudin D.I., Korovkin N.V., et al., Numerical simulation of initial breakdown pulse at the lightning leader formation stage, Global Energy, 31 (01) (2025) 19–40, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31102

© Syssoev A.A., Iudin D.I., Korovkin N.V., et al., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Введение. Анализ осциллограмм электромагнитного излучения грозового облака позволяет разделить развитие молнии (до главной стадии в случае разряда типа облако – земля) на три основных этапа. Первый из них можно назвать пробоем, второй – промежуточной фазой, а третий – стадией ступенчатого отрицательного лидера. В англоязычной литературе укоренился термин "Breakdown, Intermediate, Leader" (BIL) [1]. В некоторых исследованиях (например, [2]) данную последовательность дополняют предшествующей стадией начального изменения поля – от англоязычного термина "initial E-change" (IEC), – которая оканчивается появлением первого импульса пробоя. Данная работа посвящена численному моделированию наиболее интенсивной пробойной ("B" в последовательности BIL) стадии развития молнии.

Начальные импульсы пробоя (НИП), которые по-английски обозначаются "initial breakdown pulses" (IBPs) или "preliminary breakdown" (PB), принято определять как серию из нескольких, как правило, около десятка биполярных импульсов электрического поля, длящуюся 1–10 мс и предшествующую появлению ступенчатого отрицательного лидера молнии [1]. Для НИП, предваряющих разряды типа облако – земля и внутриоблачные молнии, характерны высоты 5–7 и 8–10 км соответственно [3].

Каждый ОНЧ–НЧ (3–300 кГц) импульс электрического поля излучения НИП длится примерно 10–40 мкс и имеет амплитуду ~1 В/м на расстоянии 100 км от источника. Импульсы последовательности отделены друг от друга паузами с типичной длительностью 10–100 мкс. Для генерации столь интенсивных импульсов электромагнитного излучения внутри грозового облака должны возникать всплески тока, сопоставимые по величине или даже большие, чем токи молнии типа облако – земля на стадии возвратного удара [1]. Это подтверждается не только простыми оценками, но и численными методами восстановления временного профиля тока НИП по осциллограммам их электрического поля излучения (см. [4] и ссылки там). Кроме «классических» ОНЧ–НЧ импульсов на осциллограммах электрического поля излучения НИП часто присутствуют гораздо более короткие, так называемые «узкие» импульсы длительностью от долей до единиц микросекунд, которые как бы наложены поверх «классических» импульсов и создают их «тонкую структуру» (см., например, [5, 6]).

В настоящее время для полевых наблюдений НИП активно применяется широкий набор средств, включающий высокоскоростные видеокамеры оптического диапазона, НЧ (30–300 кГц) антенны, широкополосные ОВЧ (30–300 МГц) интерферометры, системы высокочастотного картирования молнии "Lightning Mapping Array" (LMA), датчики гамма-квантов и прочее оборудование, позволяющее проводить комплексное исследование НИП (см., например, [6, 7]). За последние годы было записано большое количество осциллограмм электромагнитного излучения НИП (см., например, [2, 3, 5–12]), изучение которых позволяет провести исчерпывающий статистический анализ распределения параметров отдельных импульсов и пауз между ними.

Сопоставление осциллограмм электромагнитного поля излучения НИП, приведенных в различных работах, свидетельствует как о многообразии форм их импульсов, которые могут быть и биполярными, и униполярными [5], так и о значительном разбросе значений их параметров. Наряду с относительно слабыми трудно детектируемыми импульсами [13] были зафиксированы экстремально интенсивные всплески тока НИП с пиковыми амплитудами более 200 (до 584) кА [10]. Данные события получили название энергичных внутриоблачных импульсов – от англоязычного термина "energetic in-cloud pulses" (EIPs). Большой разброс пространственных масштабов и высокая вариабельность процессов, вовлеченных в развитие НИП, подчеркиваются в [11].

Особый интерес к изучению НИП связан не только с чрезвычайно большими пиковыми амплитудами их токов, но и с тем, что данная форма внутриоблачных разрядов, наряду с компактными внутриоблачными разрядами (см., например, [14]), является мощнейшим природным источником ВЧ–ОВЧ (3–300 МГц) излучения (примеры соответствующих измерений могут быть найдены в [6, 7, 11]). Кроме того, с высокой степенью точности было установлено, что НИП

отвечают за исходящие из грозового облака вспышки гамма-квантов, которые в англоязычной литературе обозначаются термином “terrestrial gamma-ray flashes” (TGF) [7, 10]. Данный факт еще раз подчеркивает чрезвычайно высокую энергетику связанных с НИП процессов. Об этом также свидетельствуют пробивающиеся через толщу облака и детектируемые на расстоянии в десятки километров мощные вспышки света, которые наблюдаются в оптическом диапазоне и совпадают по времени с моментами формирования характерных импульсов тока НИП (см. [6, 9] и ссылки там).

Наблюдения показывают, что НИП всегда или по крайней мере в подавляющем большинстве случаев предшествуют появлению лидера молнии [3] (в том числе и в случае положительных разрядов на землю [8]). Данный факт делает их неотъемлемым звеном процесса инициации молнии, механизм которого считается самой интригующей из нерешенных проблем атмосферного электричества [15].

Принято считать, что НИП обусловлены формированием ступеней так называемого начального лидера – от англоязычного термина “initial leader” (IL). Согласно предложенному в пионерских работах Б. Шонланда и др. разделению ступеней отрицательного лидера на α- и β-типы [1], НИП можно отнести к ступеням β-лидеров [1, 16]. Они характеризуются средней скоростью распространения порядка 10^6 м/с, на порядок большей, чем у α-лидеров, и имеют большие по сравнению с α-лидерами длины и светимости ступеней.

Гипотеза о ступенчатой природе НИП, по-видимому, основана на том, что акт слияния двух (или большего числа) проводящих плазменных каналов является наиболее очевидным механизмом формирования импульсных токов с наблюдаемыми для НИП параметрами. Данная концепция также объясняет происхождение ассоциированных с ОНЧ–НЧ импульсами электромагнитного излучения НИП вспышек ОВЧ излучения [6, 7, 11]. Их принято относить к импульсным коронам отрицательных стримеров, появление которых сопровождает формирование каждой ступени начального лидера [12]. Кроме того, всплески тока НИП, как и в случае ступеней отрицательного лидера молнии [1], сопровождаются вспышками оптического света [6, 9].

Хотя строгое определение понятия «начальный лидер» отсутствует, его всегда ассоциируют с некими процессами, в результате которых формируется самоподдерживающийся канал «классического» лидера молнии [4, 7, 9, 17]. Несмотря на прямую аналогию, стоит отметить, что длины ступеней начального лидера, как и промежутки времени между двумя последовательными ступенями, гораздо больше, чем у «обычного» ступенчатого отрицательного лидера. Если в случае начального лидера типичные значения длин ступеней и пауз между ними составляют порядка 0,1–1 км и 0,1–1 мс соответственно, то в случае наблюдаемых вблизи земли ступеней нисходящего отрицательного лидера речь идет о длинах ступеней в районе 1–10 м и межступенчатых интервалах порядка 10 мкс (см. [18] и ссылки там). Кроме того, амплитуды тока ступеней начального лидера, варьирующиеся в пределах 1–100 кА, как правило, заметно больше токов ступеней нисходящего отрицательного лидера, оцениваемых в несколько тысяч ампер [1]. Информация о параметрах ступеней начальных лидеров может быть найдена, например, в работах [9, 10, 13].

Концепция формирования НИП как гипертрофированных ступеней начального лидера была развита в [17] на базе эксперимента с искусственным облаком заряженного аэрозоля (см. [19] и ссылки там), в ходе которого были открыты и исследованы так называемые необычные плазменные образования – от английского “unusual plasma formations” (UPFs). Они представляют собой ранее неизвестную форму атмосферного разряда, «вызревающую» в рамках объемной стримерной сети в виде проводящих кластеров сложной формы, включающих в себя каналы с различными температурами (проводимостями). Наиболее горячие фрагменты необычных плазменных образований, формирующиеся в местах слияния токов множества стримеров, по-видимому, являются переходным звеном от стримерной сети к самоподдерживающемуся лидерному каналу.

По мнению авторов [17], импульсы тока НИП формируются в моменты слияния горячих хорошо проводящих элементов объемных плазменных сетей, заполняющих грозовое облако на стадии начального изменения поля. При этом наличие «классических» и «узких» импульсов тока НИП объясняется тем, что первые возникают в момент слияния крупных, а вторые – более мелких лидерных каналов. Данная точка зрения согласуется с бимодальным распределением длин ступеней, наблюдаемых во время развития НИП, которые составляют порядка 200 и 10 м для «классических» и «узких» импульсов электромагнитного излучения НИП соответственно [6].

Стоит отметить, что гипотеза о «ступенчатом» происхождении НИП, под которым обычно подразумевают формирование импульса тока выравнивания потенциалов в результате объединения двух лидерных каналов, разделяется не всеми исследователями. Так, авторы [4, 7, 9] отмечают, что на момент формирования НИП плазменный канал, который принято ассоциировать с начальным лидером, может быть недостаточно проводящим (горячим). Они выдвигают альтернативное предположение, согласно которому серия из нескольких пробоев, проходящих по изначально холодному плазменному каналу, постепенно повышает его температуру, что в конце концов приводит к появлению самоподдерживающегося лидера молнии.

Недавно в [7], с опорой на экспериментальные наблюдения с использованием широкого спектра новейших технических средств, был предложен альтернативный сценарий развития НИП, согласно которому характерный для него ОНЧ–НЧ импульс тока (электромагнитного излучения) возникает вследствие развития в грозовом облаке гипертрофированной лавины отрицательных стримеров с масштабами в несколько сотен метров, плоский фронт которой распространяется со скоростью порядка 10^7–10^8 м/с. При этом наблюдаемые на осциллограммах напряженности электрического поля излучения микросекундные субимпульсы формируются за счет слияния проводящих плазменных образований, образующихся в хвосте стримерной лавины. Предполагается, что данные слияния порождают ассоциированные с НИП вспышки гамма-квантов.

Существующие на данный момент численные модели (например, [4, 16, 20, 21]) подразумевают, что импульсы тока НИП формируются по аналогии со ступенями отрицательного лидера. Большинство из них базируется на различных модификациях концепции передающей линии (соответствует англоязычному термину “transmission line models”) [4, 16], которая традиционно используется для анализа главной стадии молнии [1]. В этих моделях каждый импульс тока обусловлен присоединением к каналу новой прямолинейной секции длиной 50–1500 м. Среди недостатков данного подхода можно отметить отсутствие предварительной стадии развития разряда, относительно низкое пространственное разрешение и сильно упрощенное описание эволюции разрядных каналов (в том числе стримерно-лидерного перехода), которая во многом задается «вручную». Целью данной работы является создание и апробация альтернативной численной модели развития НИП, объединяющей в себе элементы концепции передающей линии и электростатических эволюционных моделей развития молнии. Будет показано, что в рамках данного подхода генерация НИП может быть объяснена как естественная часть процесса формирования лидера молнии.

Постановка задачи

Область моделирования представляет собой отрезок на вертикальной оси z протяженностью 600 м, центр которого расположен на высоте 6 км над уровнем моря. Он разбит на сегменты длиной $a = 0{,}6$ м, которая задает пространственное разрешение модели. Предполагается, что рассматриваемый отрезок расположен между нижним положительным и основным отрицательным слоями заряда облака. Вертикальные профили потенциала φ_a и напряженности электрического поля E_a, в которых начинает развиваться разряд, показаны на рис. 1. Наложенные на гладкий крупномасштабный профиль осцилляции напряженности электрического поля с пространственным периодом, равным 480 м, могут быть объяснены механизмом пучковой неустойчивости, развивающейся в плазмоподобной среде и приводящей к крупномасштабному (десятки – сотни

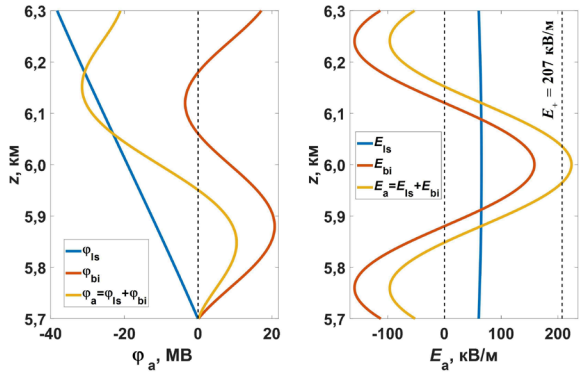


Рис. 1. Вертикальные профили внутриоблачного потенциала φ_a (слева) и напряженности электрического поля E_a (проекция на ось z, справа) на момент начала развития системы, состоящие из крупномасштабной компоненты (индекс «ls») и осциллирующей части, создаваемой развитием пучковой неустойчивости (индекс «bi»). Нуль потенциала соответствует нижней границе области моделирования

Fig. 1. Vertical profiles of the intracloud potential φ_a (on the left) and electric field strength E_a (projection onto z-axis, on the right) at the beginning of the system development. They are formed by a large-scale component (index "ls") and an oscillating part created by development of the beam instability (index "bi"). Zero potential corresponds to the lower boundary of the simulation domain

метров) разделению пространственного заряда внутри грозового облака. Данная неустойчивость реализуется в многокомпонентной среде облака и приводит к возникновению экспоненциально растущей волны пространственного заряда, переносимой вверх конвективным потоком [22, 23]. По мнению авторов [22, 23], возникающие при этом осцилляции напряженности электрического поля могут быть достаточными для инициации молнии.

Рассматриваемое значение высоты над землей определяет концентрацию молекул окружающего воздуха N, тем самым задавая характерные значения напряженности электрического поля E (E/N = const) и линейных масштабов разряда d ($d \cdot N$ = const). На используемой в расчетах высоте, равной 6 км, концентрация молекул воздуха уменьшается до

$$\delta = \frac{N_a}{N_0} = \frac{p_a T_0}{T_a p_0} = 0{,}54 \qquad (1)$$

от приземного значения, где p и T – давление и температура воздуха, а индексы «a» и «0» соответствуют рассматриваемой и нулевой высотам соответственно. Входящие в формулу (1) значения давления и температуры воздуха были взяты из открытого интернет-источника [24], данные которого соответствуют международной стандартной атмосфере. Вследствие относительно небольшой вертикальной протяженности области моделирования в расчетах используется центральное значение высоты.

Моделирование токовой системы НИП

Модель рассматривает следующий механизм формирования одномерной токовой системы разряда. Каждые 15 мкс в случайное место внутри области максимума напряженности внутриоблачного электрического поля «вбрасывается» затравочная стримерная связь с минимальной длиной a = 0,6 м. Возможный механизм возникновения внутри грозового облака стримерных разрядов с масштабами 0,1–1 м описан, например, в [25]. Если значение напряженности электрического поля в точке появления затравочной связи достаточно велико, ее проводимость постепенно увеличивается (см. формулу (3)), в результате чего связь поляризуется и начинает расти. В ином случае она теряет проводимость и остается «неактивной».

Разрядные каналы могут удлиняться в обе стороны, прирастая стримерными сегментами с той же минимальной длиной a. Появление новых каналов положительных и отрицательных стримеров, растущих в направлении убывания и роста электрического потенциала соответственно, происходит, если напряженность электрического поля на границе канала превышает E_+ и E_- для новообразованных сегментов положительной и отрицательной полярности. Используемое в модели поле поддержания роста положительных стримеров рассчитывается по аппроксимирующей экспериментальные данные формуле из работы [26]:

$$E_+\left[\text{кВ/м}\right] = 517\cdot\delta^{1,23}\left(1+\frac{1,76\cdot\delta^{-0,65}}{100}\left(\tilde{h}\left[\text{г/м}^3\right]-11\right)\right) = 207\ \text{кВ/м}, \tag{2}$$

где $\tilde{h}$ – абсолютная влажность воздуха, значения которой в зависимости от высоты приведены в интернет-источнике [24]. В силу двукратной асимметрии пороговых полей поддержания роста положительных и отрицательных стримеров [27], $E_- = 2E_+ = 415$ кВ/м.

Скорости роста положительных и отрицательных стримеров зависят от локальной напряженности электрического поля. Они находятся путем линейной аппроксимации данных, представленных на рис. 4b работы [28] с тем условием, что полученные таким образом значения не могут быть ниже минимальной скорости распространения стримеров, оцениваемой как $2\cdot10^5$ м/с [27]. Поскольку скорость роста стримеров не должна зависеть от плотности воздуха (высоты над землей) [29], в ее расчетах используется приземный эквивалент напряженности электрического поля E/δ.

В момент появления разрядные каналы обладают малой начальной проводимостью $\sigma_0 = 10^{-5}$ См/м. Эволюция проводимости холодных стримерных каналов описывается полуэмпирической формулой

$$\frac{d\sigma}{dt} = \left(\eta E^2 - \beta\right)\sigma, \tag{3}$$

где $\eta = 1,5\cdot10^{-5}$ м^{2}В$^{-2}$с$^{-1}$ и $\beta = 6,45\cdot10^3$ с$^{-1}$. Проводимость стримера ограничена сверху значением $\sigma_{s_\max} = 4$ См/м. Ток поляризации стримерного канала находится по закону Ома:

$$I = \pi r_{str}^2\sigma E = \frac{E}{R_l}, \tag{4}$$

где $r_{str} = 2$ см – радиус проводимости (соответствующий приземный эквивалент составляет 1,08 см), R_l – погонное сопротивление канала. Для сравнения, в [21] радиус моделируемого канала принят равным 1 см на высотах 6–8 км.

Для каждого разрядного канала решается уравнение теплопроводности

$$\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} - div\left(k_T\nabla T\right) = \sigma E^2 - \varepsilon_{rad}, \tag{5}$$

правая часть которого включает источник в виде джоулева нагрева σE^2 и сток в виде потерь на излучение ε_{rad}. Используется приближение постоянного давления:

$$p = \frac{\rho R_g TZ}{M_0} = \text{const}, \tag{6}$$

где ρ – плотность воздуха, R_g = 8,31 Дж·К$^{-1}$·моль$^{-1}$ – универсальная газовая постоянная, M_0 = = 29 г·моль$^{-1}$ – молярная масса ненагретого воздуха, $Z = M_0/M$ – сжимаемость газа, отражающая уменьшение его молярной массы M с ростом температуры. Входящие в уравнения (5) и (6) коэффициент теплопроводности k_T, молярная теплоемкость при постоянном давлении c_p и плотность воздуха ρ (с учетом сжимаемости Z) являются функциями давления и температуры воздуха [30]. Радиационные потери температуры канала ε_{rad} отвечают случаю оптически тонкой плазмы из работы [31]. Поскольку исходные данные для радиационных потерь соответствуют энергии, излучаемой единичным объемом в единицу телесного угла, при подстановке в уравнение (5) их необходимо умножить на 4π стерадиан. В рамках радиально-симметричного приближения структуры канала уравнение (5) можно переписать в форме

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p}\left(\frac{k_T}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial k_T}{\partial T}\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2 + k_T\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \sigma E^2 - \varepsilon_{rad}\right). \tag{7}$$

Для ускорения расчетов уравнение (7) решается в рамках упрощающего приближения, предполагающего постоянство функционального профиля радиального распределения температуры канала:

$$T(r) = T_a + (T_m - T_a)e^{-(r/r_T)^2}, \tag{8}$$

где T_m – максимальное (осевое) значение температуры, r_T – термический радиус канала, равный 4 см (соответствующий приземный эквивалент составляет 2,16 см). При таком предположении достаточно решать уравнение (7) в единственной точке (r_{eff}, T_{eff}), усредняя его по радиусу от нуля до некоторого радиуса отсечки, который принят равным r_T. Эффективная температура T_{eff}, отвечающая радиусу r_{eff}, находится интегрированием:

$$T_{eff} = T(r_{eff}) = T_a + (T_m - T_a)\frac{\int_0^{r_T} e^{-(r/r_T)^2}dr}{r_T} = T_a + (T_m - T_a)\frac{\sqrt{\pi}\cdot\mathrm{erf}(1)}{2}, \tag{9}$$

где erf(x) – функция ошибок Гаусса.

На момент возникновения стримерного канала, который в данной работе ассоциируется с пучком однонаправленных стримеров, ему присваивается начальное значение осевой температуры T_m, которое, вследствие малости нагрева воздуха стримерным разрядом [27], всего на 1 K превышает температуру окружающего воздуха T_a. Если температура на оси канала превышает условный порог T_c = 4500 K, соответствующий диапазону температур стримерно-лидерного перехода [27], он становится лидерным.

Для горячих лидерных каналов, плазму которых можно считать равновесной, существует однозначная связь между температурой T и проводимостью σ (с учетом давления воздуха) [30]. Это позволяет вычислить погонное сопротивление лидерного канала

$$R_l = \left(\int_0^\infty \sigma(T(r))2\pi r dr\right)^{-1}, \tag{10}$$

подстановка которого в закон Ома (4) позволяет найти ток лидера. Верхний предел интегрирования в формуле (10) формально выбран бесконечно большим, поскольку при приближении к T_a равновесное значение проводимости плазмы быстро стремится к нулю, так что после определенного

значения радиуса интеграл перестает расти. Из соотношений (4) и (10) следует, что ток лидерного канала полностью определяется текущими значениями его температуры и напряженности продольного электрического поля в нем. В целях соблюдения условия непрерывности тока в момент стримерно-лидерного перехода минимальное погонное сопротивление стримерного канала $(\sigma_{s_\max}\pi r_{str}^{\,2})^{-1}$ совпадает с максимальным (начальным) погонным сопротивлением лидера, которое достигается при температуре стримерно-лидерного перехода T_c = 4500 K и составляет 197 Ом/м. Отметим, что используемая в модели максимальная проводимость стримерного канала $\sigma_{s_\max}$ = 4 См/м также может рассматриваться как минимальная (начальная) проводимость лидерного сегмента. Данное значение совпадает по порядку величины с оценочной проводимостью канала лабораторного лидера длиной в несколько метров, который характеризуется током ~1 А, токовым радиусом ~1 мм и продольным полем ~500 В/см [27].

Токи выравнивания потенциалов (4) создают точечные заряды, размещенные в узлах моделируемого отрезка. Потенциал φ_q, создаваемый точечным зарядом q на расстоянии d от него находится по закону Кулона:

$$\varphi_q = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 \max\left(a/2, d\right)}, \tag{11}$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума, а случай деления на половину пространственного шага модели $a/2$ = 0,3 м соответствует вкладу точечного заряда в потенциал узла, в котором он находится, что позволяет решить проблему сингулярности. В силу удаленности от земли формула (11) пренебрегает вкладом со стороны наведенных на ее поверхности зарядов.

Модель учитывает процесс формирования чехла заряда вокруг лидерного канала. Напряженность радиального поля E_r вокруг лидерной жилы радиуса r_l можно оценить из теоремы Гаусса, мысленно «размазав» точечный заряд q по отрезку длиной a, который соответствует расстоянию между двумя соседними узлами:

$$E_r = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 r_l a}. \tag{12}$$

Задав проводимость ионизированной среды чехла $G = 10^{-5}$ См/м, можно найти поперечный ток утечки $I_\perp$ через боковую поверхность канала:

$$I_\perp = GE_r 2\pi a r_l = \frac{Gq}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\tau_{sh}}, \tag{13}$$

где $\tau_{sh} = \varepsilon_0/G = 0{,}89$ мкс – характерное время перехода заряда с поверхности канала в чехол. Аналогичная (13) формула была использована в модели [20] при τ_{sh} = 0,5 мкс, что соответствует G = $= 1{,}77\cdot10^{-5}$ См/м. Используемое в расчетах значение проводимости чехла заряда вокруг лидерного канала укладывается в пределы оценки 10^{-6}–10^{-5} См/м, полученной в [32].

Чтобы найти вклад заряда чехла лидерного канала в потенциал на рассматриваемой оси, нужно знать радиальное распределение объемной плотности заряда в чехле $\rho_{sh}(r)$. Согласно [27], внутри чехла заряда лидера приближенно выполняется условие E_r = const. Из дифференциальной формы теоремы Гаусса, записанной для цилиндрической системы координат:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rE_r\right) = \frac{\rho_{sh}}{\varepsilon_0}, \tag{14}$$

следует, что этому требованию удовлетворяет зависимость типа

$$\rho_{sh}(r)=\frac{A}{r}, \tag{15}$$

где A – некоторая константа. Чтобы найти ее, повторим прием с мысленным «размазыванием» заряда элемента чехла q_{sh} по отрезку длиной a и запишем нормировочное условие

$$q_{sh}=a\int_{\eta}^{R_{sh}}\rho_{sh}(r)2\pi r dr=2\pi Aa\left(R_{sh}-r_l\right)\approx 2\pi AaR_{sh}, \tag{16}$$

где $R_{sh}>>r_l$ – радиус чехла заряда вокруг лидерного канала. Из (16) следует, что

$$A=\frac{q_{sh}}{2\pi aR_{sh}}. \tag{17}$$

Элементарный цилиндрический сегмент чехла с минимальной вертикальной протяженностью a, заключающий внутри себя заряд q_{sh} и ограниченный по вертикали значениями $z_1=z_q-a/2$ и $z_2=z_q+a/2$, где z_q – центральная высота расположения заряда q_{sh}, создает в точке на оси z с координатой z_0 потенциал

$$\varphi_{sh}(z_0)=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_{z_1}^{z_2}dz\int_{\eta}^{R_{sh}}dr\frac{\rho_{sh}(r)2\pi r}{\sqrt{r^2+\left(z-z_0\right)^2}}. \tag{18}$$

Опуская промежуточные выкладки, с учетом (15) и (17) получаем

$$\varphi_{sh}(z_0)=\frac{q_{sh}}{4\pi\varepsilon_0 aR_{sh}}\left(f\left(R_{sh},z_2,z_0\right)-f\left(R_{sh},z_1,z_0\right)-f\left(r_l,z_2,z_0\right)+f\left(r_l,z_1,z_0\right)\right), \tag{19}$$

где

$$f\left(r,z,z_0\right)=\left(z-z_0\right)\ln\left(r+\sqrt{r^2+\left(z-z_0\right)^2}\right)+r\ln\left(z-z_0+\sqrt{r^2+\left(z-z_0\right)^2}\right). \tag{20}$$

Полный электрический потенциал, создаваемый зарядом чехла лидера в точке z_0, находится суммированием вкладов (19) от всех его участков.

Входящий в формулы (16)–(19) радиус чехла заряда вокруг лидерного канала R_{sh} можно оценить из теоремы Гаусса, предполагая, что внутри чехла радиальное поле совпадает с порогом роста положительных стримеров $E_r=E_+$ [27]. Тогда

$$R_{sh}=\frac{q_l}{2\pi\varepsilon_0 E_+}, \tag{21}$$

где q_l – погонный заряд лидера (с учетом чехла). Оценивая q_l как 250 мкКл/м (см. рис. 2), что ожидаемо меньше значения ~1 мКл/м [1, 33], характерного для многокилометрового лидера «развитой» молнии, получаем $R_{sh}=21{,}7$ м. Строго говоря, в силу асимметрии пороговых полей поддержания роста положительных и отрицательных стримеров формула (21) должна давать вдвое меньшее

значение для отрицательного лидера. Но поскольку соотношение (21) использует грубую оценку погонного заряда q_l и поскольку конечный результат (19) слабо зависит от R_{sh}, это обстоятельство не принимается во внимание. В данной модели формирующие чехол заряда токи утечки имеют место только для хорошо проводящих лидерных сегментов с температурой выше T_c = 4500 K.

Результаты

Основные этапы моделирования представлены на рис. 2, который показывает вертикальные распределения (слева направо): 1) электрического потенциала φ; 2) E_z-компоненты напряженности электрического поля; 3) погонного заряда системы q_z. Шесть панелей рис. 2, построенные для различных моментов времени, дают общее представление о динамике развития разряда. На начальном этапе центральная зона, внутри которой напряженность внутриоблачного поля относительно велика, заполняется двунаправленно растущими стримерными сегментами, которые постепенно срастаются друг с другом. Формируется пара сближающихся искровых каналов с длинами 95 м (снизу) и 59 м (сверху) и средними проводимостями на уровне 1,5 См/м и 0,5 См/м соответственно, напряженность электрического поля между головками которых локально усилена. В момент времени 70 мкс они сливаются в единый канал, что приводит к кратковременному всплеску тока с амплитудой порядка 1,5 кА, который виден на рис. 3. Данный эпизод напоминает процесс формирования ступени отрицательного лидера, при котором также возникают импульсы тока поляризации с характерными пиковыми значениями порядка нескольких тысяч ампер [1], хотя в данном случае проводимость объединяющихся каналов находится на уровне слаботочного лабораторного лидера [27]. Температура теперь уже единого канала постепенно растет за счет текущего по нему тока выравнивания потенциалов. Через 74 мкс после начала моделирования в точке слияния двух искровых каналов, в окрестности которой объемная плотность мощности джоулева энерговыделения остается относительно высокой, появляется первый лидерный сегмент с температурой выше порога стримерно-лидерного перехода T_c = 4500 K.

С появлением первого лидерного сегмента запускается петля положительной обратной связи, которая приводит к быстрому, за время порядка микросекунды, переходу канала длиной ~200 м из слабо проводящего (условно стримерного) состояния в хорошо проводящее лидерное. Согласно рис. 3, на котором представлены высотно-временные распределения тока, температуры и проводимости моделируемой системы, данный переход приходится на момент времени t = 81,5 мкс от начала моделирования. Наличие положительной обратной связи обусловлено резкой зависимостью равновесной проводимости горячей лидерной плазмы от температуры [30]. Даже незначительное увеличение температуры лидерного канала приводит к заметному росту его проводимости. Вследствие этого увеличивается плотность мощности джоулева энерговыделения σE^2, что влечет дальнейшее увеличение температуры и проводимости канала. Это провоцирует распространяющуюся вверх и вниз по каналу волну резкого роста тока, которая начинает затухать в результате падения продольного электрического поля канала, после чего температура лидера перестает расти и стабилизируется на уровне ~10 кК. Возникающий всплеск тока поляризации имеет амплитуду порядка 13,5 кА и длится около 2 мкс.

На финальном этапе (спустя 100 мкс после начала моделирования) система представляет собой лидерный канал длиной 440 м с характерными значениями температуры, проводимости, тока и погонного заряда на уровне 9 кК, 1,5 кСм/м, 200 А и 400 мКл/м соответственно. Данные параметры хорошо согласуются с таковыми для ступенчатого отрицательного лидера молнии до момента контакта с землей, который характеризуется температурой около 10 кК, током 100–200 А и погонным зарядом ~1 мКл/м [1]. Описание дальнейшей эволюции сформировавшегося лидера молнии выходит за пределы данного исследования.

Наиболее очевидным способом верификации полученных результатов является сравнение осциллограммы напряженности вертикальной компоненты электрического поля излучения,

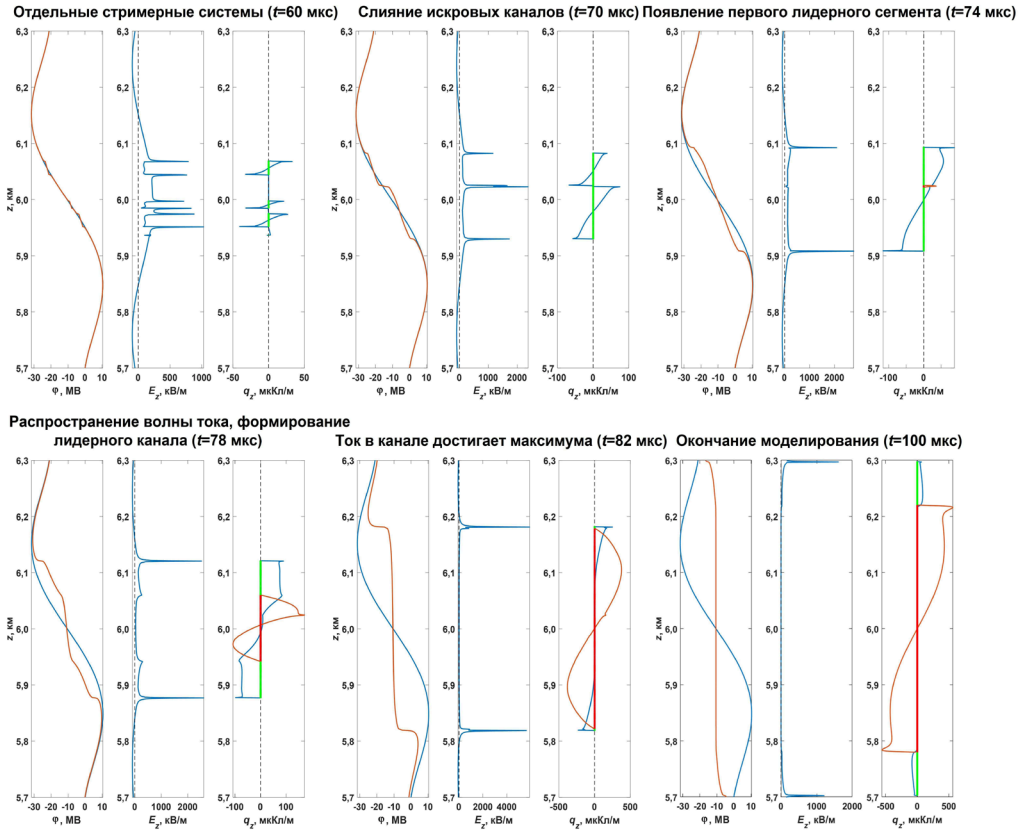


Рис. 2. Высотные распределения электрического потенциала φ (синяя линия – начальный потенциал, оранжевая линия – текущий потенциал), напряженности электрического поля E_z и погонного заряда q_z (синяя линия – погонный заряд канала, оранжевая линия – погонный заряд чехла лидерного канала) моделируемой системы на различных этапах ее развития. Зеленые и красные отрезки на панели погонного заряда обозначают стримерные и лидерные сегменты соответственно

Fig. 2. Altitude distributions of electric potential φ (blue line – initial potential, orange line – actual potential), electric field strength E_z, and linear charge q_z (blue line – per-unit-length channel charge, orange line – per-unit-length charge of the leader channel sheath) of the simulated system at different stages of its development. Green and red segments on the per-unit-length charge panel indicate streamer and leader channels, respectively

создаваемой моделируемым НИП в точке расположения приемной антенны, с экспериментальными данными. Для ее построения будем использовать формулу, позволяющую найти статическую, индукционную и радиационную составляющие вертикальной компоненты электрического поля излучения на горизонтальном расстоянии D от источника по вертикальному току излучателя $I(z, t)$, ограниченного высотами z_1 и z_2, с учетом эффекта запаздывания:

$$E_z^{rad}(D,t) = \\ = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\left(\int_{z_1}^{z_2}\frac{2z^2-D^2}{R^5(z)}\int_0^{t'} I(z,\tau)\,d\tau dz + \int_{z_1}^{z_2}\frac{2z^2-D^2}{cR^4(z)} I(z,t')\,dz - \int_{z_1}^{z_2}\frac{D^2}{c^2R^3(z)}\frac{\partial I(z,t')}{\partial t}dz\right), \quad (22)$$

где $R=\sqrt{z^2+D^2}$ – расстояние от источника излучения до антенны, $t' = t - R/c$, $c = 3\cdot10^8$ м/с – скорость света в вакууме (методика расчета электрического поля излучения для разрядной системы, состоящей из большого числа произвольно ориентированных токовых каналов, может быть найдена в [34]). Рассчитанная таким образом для стандартного горизонтального расстояния от

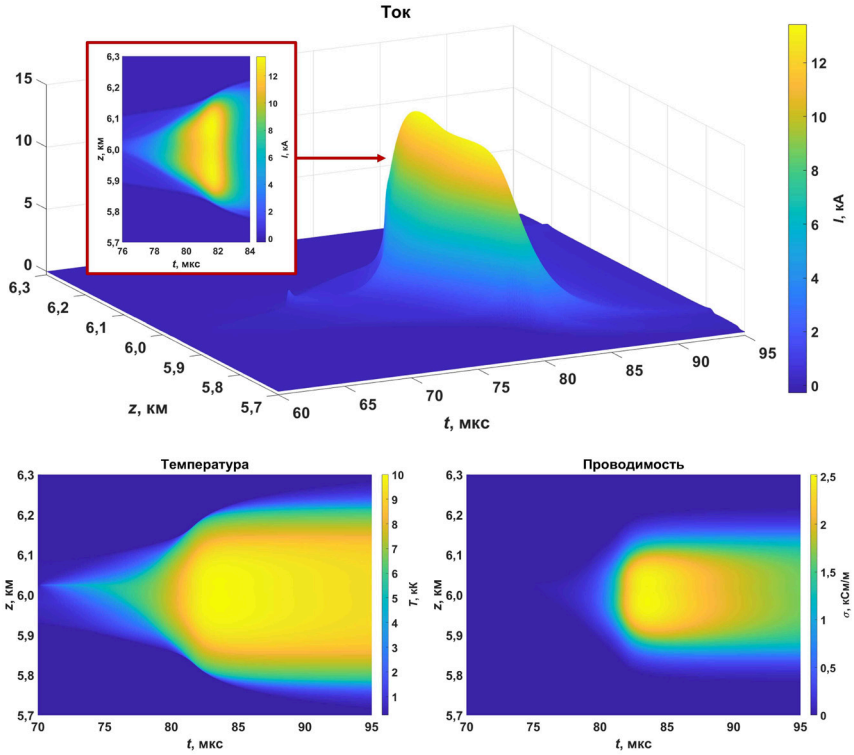


Рис. 3. Высотно-временные профили тока, температуры и проводимости моделируемого НИП
Fig. 3. Altitude-time profiles of current, temperature, and conductivity of the modeled IBP

приемной антенны до источника D = 100 км осциллограмма вертикальной компоненты напряженности электрического поля излучения моделируемой токовой системы представлена на рис. 4. Результирующий биполярный импульс имеет длительность порядка 15 мкс и пиковое значение, равное ~3 В/м, что хорошо согласуется с описанными во введении экспериментальными данными.

На представленной на рис. 4 осциллограмме отчетливо виден предшествующий основному импульсу всплеск электрического поля излучения с длительностью ~0,1 мкс и амплитудой 0,36 В/м. Подобные «узкие» всплески электромагнитного поля излучения НИП с длительностью от долей до единиц микросекунд, формирующие «тонкую структуру» его электромагнитного излучения, обширно представлены на экспериментально полученных осциллограммах [5, 6]. Их происхождение принято объяснять формированием «небольших» ступеней, сопровождающих слияния относительно коротких искровых каналов, вложенных в трехмерную плазменную сеть, заполняющую зону относительно сильного электрического поля внутри грозового облака [17]. Из результатов моделирования следует, что источником данных импульсов могут быть относительно небольшие всплески тока (в данном случае 1,5 кА, см. рис. 3), возникающие в моменты слияний поляризованных в электрическом поле облака искровых каналов, которые происходят еще до формирования лидера молнии. Таким образом, результаты моделирования в целом подтверждают предположение работы [17].

Обсуждение

Данное исследование ограничено моделированием единственного «классического» ОНЧ–НЧ импульса тока (электрического поля излучения) НИП, возникающего в результате появления лидерного канала длиной в несколько сотен метров. В реальной ситуации наблюдается серия НИП, насчитывающая порядка десяти импульсов, разделенных паузами с характерной длительностью

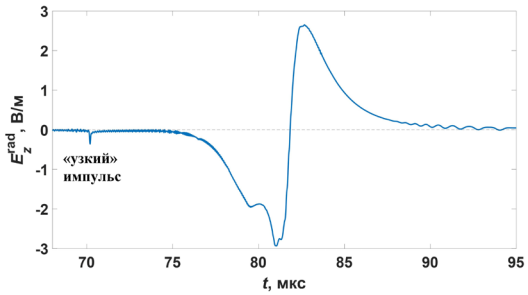


Рис. 4. Осциллограмма вертикальной компоненты напряженности электрического поля излучения моделируемого НИП на стандартном горизонтальном расстоянии от источника $D = 100$ км. Значения времени даны без учета задержки на распространение сигнала

Fig. 4. The waveform of the vertical component of radiation electric field strength produced by the simulated IBP at a standard horizontal distance from the source $D = 100$ km. Time values are given without taking into account the signal propagation delay

10–100 мкс. Их происхождение можно объяснить, во-первых, появлением других лидерных каналов и, во-вторых, актами слияния хорошо проводящих лидерных каналов, при которых образуются гипертрофированные ступени начального лидера. Возникновение множественных импульсов пробоя можно объяснить двумя факторами. Первый заключается в том, что в результате развития пучковой плазменной неустойчивости [22, 23] формируется несколько разделенных по вертикали зон локального максимума напряженности электрического поля, каждая из которых потенциально может стать очагом формирования лидерного канала. Второй связан с достаточно большой горизонтальной протяженностью области (которая не учитывается данной моделью в силу ее одномерности), внутри которой напряженность внутриоблачного электрического поля достаточна для инициации молнии. Иными словами, внутри «активной» части грозового облака существует множество зон, способных породить лидерные каналы с характерными длинами порядка 100 м, которые способны объединяться между собой, что в конце концов приводит к формированию самоподдерживающегося биполярного лидера молнии.

Представленный в работе численный подход имеет ряд черт, отличающих его от предыдущих моделей НИП (например, [4, 16, 20, 21]). Во-первых, пространственный шаг модели составляет 0,6 м (для сравнения, в [21] пространственное разрешение составляет 5 м), что обеспечивает высокую степень детализации и позволяет выделять в общей структуре разряда стримерные и лидерные сегменты. Во-вторых, используемая модель описывает самосогласованный процесс формирования плазменного канала, в то время как в альтернативных подходах он существует изначально и на момент начала моделирования имеет некоторые предустановленные параметры. В-третьих, модель принимает во внимание процессы нагрева/охлаждения разрядных каналов, что позволяет привязать проводимость горячих лидерных элементов к их температуре (в равновесном приближении). Это позволяет физически корректно описать токи лидерных каналов, что особенно важно для моделирования сильноточных внутриоблачных разрядов (см. также [35, 36]), к которым безусловно можно отнести НИП. Аналогичный прием был использован в [20], но в рамках сильно упрощенного рассмотрения эволюции температуры канала. Для описания эволюции проводимости стримерных каналов, плазма которых неравновесна, используется полуэмпирическая формула (3). Более физичный подход требует учета ряда плазмохимических процессов, что на данный момент практически неосуществимо в рамках моделей, оперирующих большим числом разрядных каналов (подробное обсуждение данной проблемы приведено в работе [35]).

К сильным сторонам представленной модели также можно отнести отсутствие большого числа упрощающих предположений. Для сравнения, модели передающей линии (например, [4, 16]) требуют задания внедряемого в изначально существующий канал тока как функции координаты

и времени. Еще одним входным параметром данных моделей является скорость распространения импульса тока.

Модель описывает такую важную часть процесса инициации молнии, как формирование чехла заряда лидера. Изначально заряд на моделируемой оси возникает в ходе развития стримерных разрядов. Позднее, начиная с момента появления первых лидерных сегментов, окружающее их пространство в течение некоторого времени заряжается токами утечки (см. формулу (13)). Данный процесс отражает тот факт, что тонкий лидерный канал, находящийся под высоким напряжением и обладающий очень малой по сравнению с чехлом электрической емкостью, не способен удержать в себе большой заряд, передавая его в чехол посредством радиальных токов [27]. На момент окончания моделирования система представляет собой биполярный лидер молнии, имеющий более-менее гладкое распределение погонного заряда с четко выраженными положительной и отрицательной частями (см. рис. 2). Аналогичный подход к перезарядке чехла заряда вокруг лидерного канала был предложен в работе [20], однако ее результаты ограничены рассмотрением единственной ступени изначально существующего начального лидера и поэтому не описывают формирование исходного чехла заряда лидера. Кроме того, в отличие от данной работы модель [20] не принимает во внимание зависимость (15) объемной плотности заряда внутри чехла от радиальной координаты. В [21] чехол заряда вокруг лидерного канала не задан явно, однако его электрическая емкость учитывается путем искусственного увеличения относительной диэлектрической проницаемости канала.

Согласно господствующей гипотезе, импульсы тока (электромагнитного излучения) НИП возникают в результате формирования ступеней начального лидера, которые также ассоциируют с β-ступенями отрицательного лидера. Поэтому в существующих моделях НИП на момент начала моделирования лидерный (или по крайней мере проводящий) канал уже существует. Однако в данной работе показано, что НИП также могут быть следствием практически мгновенного («взрывного») формирования горячего лидерного канала длиной в несколько сотен метров, в основе которого лежит резкая зависимость равновесной проводимости горячей лидерной плазмы от температуры. В некотором смысле данный процесс можно рассматривать как фазовый переход от слабо проводящего (стримерного) состояния канала к хорошо проводящему лидерному. При этом управляющим параметром данного перехода является температура канала. Похожие идеи были высказаны в исследованиях [4, 7, 9], в которых обсуждается возможность прогрева токами НИП изначально холодного плазменного канала, ассоциированного с начальным лидером. Основное отличие от результатов данной работы заключается в том, что, по мнению авторов [4, 7, 9], для установления самоподдерживающегося лидера молнии требуется не один НИП, а серия последовательных импульсов пробоя, каждый из которых повышает температуру (проводимость) канала.

Модель также описывает экспериментально наблюдаемые «узкие» импульсы электромагнитного излучения НИП с характерной длительностью 0,1–1 мкс, источниками которых являются относительно небольшие всплески тока, возникающие в моменты слияний поляризованных в электрическом поле облака искровых каналов. Генерация «узких» импульсов предшествует процессу «взрывного» формирования лидера молнии, который обеспечивает появление «классических» ОНЧ–НЧ импульсов тока (электромагнитного излучения) НИП.

В целом промоделированная последовательность процессов согласуется со сценариями инициации молнии [17, 25, 37], согласно которым горячий самоподдерживающийся лидерный канал «вызревает» внутри изначально холодной объемной сети плазменных каналов, представленной в данной модели в виде одномерного аналога. Во многом схожий с результатами данной работы процесс формирования компактных внутриоблачных разрядов был недавно промоделирован в [36].

Важную роль в развитии модельного НИП играет начальный профиль внутриоблачного потенциала (см. рис. 1). Его волнообразный рельеф, являющийся результатом развития пучковой

неустойчивости в плазмоподобной облачной среде [22, 23], создает «четочный» вертикальный профиль напряженности электрического поля. Это способствует формированию плазменного канала, перекрывающего зону максимума напряженности электрического поля, длина которого достаточна для генерации НИП с экспериментально наблюдаемыми параметрами.

Представленная модель объединяет в себе элементы электростатических подходов, традиционно используемых для описания роста древовидной структуры молнии (например, [18, 34–36, 38–41]), и приближения передающей линии с распределенными по высоте параметрами (например, [4, 16]). Одним из очевидных недостатков модели является ее одномерность. Данное ограничение связано с тем, что высокое пространственное разрешение, раздельное рассмотрение тонкой лидерной жилы и чехла заряда вокруг лидерного канала, а также учет эволюции температуры разрядных каналов (даже в упрощенной форме) требуют значительных вычислительных ресурсов. Авторы планируют преодолеть данное ограничение в будущих работах, в которых НИП будут исследованы в рамках более совершенных трехмерных моделей с сохранением (развитием) всех прогрессивных черт представленного подхода. Кроме прочего, многомерность разрядного древа важна для описания фундаментальных эффектов, связанных с асимметрией развития положительного и отрицательного полюсов молнии, в основе которых лежит смещение точки реверса молнии в сторону доминирующей по периферийному току части [42].

Заключение

В работе представлена и апробирована численная модель, в рамках которой был воспроизведен импульс тока НИП с амплитудой и длительностью 13,5 кА и ~2 мкс соответственно. Модель обладает высоким пространственно-временным разрешением, учитывает эволюцию температуры разрядных каналов и воспроизводит процесс формирования чехла заряда лидера. В отличие от предшествующих работ, моделирование начинается с момента появления в грозовом облаке первых стримерных каналов. Это позволяет не только описать формирование «классического» и «узкого» импульсов тока (электромагнитного излучения) НИП, но и детально промоделировать весь процесс инициации молнии (формирования начального лидера), происходящий самосогласованным образом. Результаты моделирования показывают, что импульсы тока НИП могут возникать не только как гипертрофированные ступени отрицательного лидера, что на данный момент является основной гипотезой, но и в результате появления лидерного канала длиной в несколько сотен метров. При этом источником «узких» импульсов НИП могут быть всплески тока, возникающие в моменты слияний поляризованных в электрическом поле облака искровых каналов. Сопутствующий формированию «классического» ОНЧ–НЧ импульса электрического поля излучения (тока) НИП переход стримерных каналов в лидерное состояние имеет «взрывной» характер. Физически это объясняется резкой зависимостью равновесной проводимости горячей лидерной плазмы от температуры. Процесс формирования лидерного канала можно рассматривать как фазовый переход от слабо проводящего стримерного состояния канала к хорошо проводящему лидерному, управляющим параметром которого является температура плазмы канала. Предсказанные моделью параметры НИП и соответствующие осциллограммы напряженности электрического поля излучения хорошо согласуются с натурными измерениями. Результаты работы важны для лучшего понимания процесса инициации молнии в грозовом облаке. Модификации представленной модели, сильной стороной которой является высокая степень детализации разрядных процессов и учет термодинамических аспектов развития плазменных каналов, могут быть использованы для моделирования формирования сильноточных молниевых разрядов в трехмерном случае.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Rakov V.A., Uman M.A.** Lightning: Physics and effects, NY: Cambridge University Press, 2003. 687 p.

[2] **Chapman R., Marshall T., Karunarathne S., Stolzenburg M.** Initial electric field changes of lightning flashes in two thunderstorms, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122 (7) (2017) 3718–3732, DOI: 10.1002/2016JD025859

[3] **Smith E.M., Marshall T.C., Karunarathne S., Siedlecki R., Stolzenburg M.** Initial breakdown pulse parameters in intracloud and cloud-to-ground lightning flashes, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123 (4) (2018) 2129–2140, DOI: 10.1002/2017JD027729

[4] **Karunarathne N., Marshall T.C., Karunarathne S., Stolzenburg M.** Studying sequences of initial breakdown pulses in cloud-to-ground lightning flashes, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (3) (2020) e2019JD032104, DOI: 10.1029/2019JD032104

[5] **Nag A., DeCarlo B.A., Rakov V.A.** Analysis of microsecond- and submicrosecond-scale electric field pulses produced by cloud and ground lightning discharges, Atmospheric Research, 91 (2–4) (2009) 316–325, DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.01.014

[6] **Petersen D., Beasley W.** High-speed video observations of the preliminary breakdown phase of a negative cloud-to-ground lightning flash, XV International Conference on Atmospheric Electricity, (2014) 1–10, DOI: 10.13140/RG.2.1.1333.9044

[7] **Belz J.W. et al.** Observations of the origin of downward terrestrial gamma-ray flashes, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (23) (2020) e2019JD031940, DOI: 10.1029/2019JD031940

[8] **Gomes C., Cooray V.** Radiation field pulses associated with the initiation of positive cloud to ground lightning flashes, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66 (12) (2004) 1047–1055, DOI: 10.1016/j.jastp.2004.03.015

[9] **Stolzenburg M., Marshall T.C., Karunarathne S., Karunarathna N., Orville R.E.** Leader observations during the initial breakdown stage of a lightning flash, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119 (21) (2014) 12,198–12,221, DOI: 10.1002/2014JD021994

[10] **Lyu F., Cummer S.A., McTague L.** Insights into high peak current in-cloud lightning events during thunderstorms, Geophysical Research Letters, 42 (16) (2015) 6836–6843, DOI: 10.1002/2015GL065047

[11] **Kolmasova I., Marshall T., Bandara S., Karunarathne S., Stolzenburg M., Karunarathne N., Siedlecki R.** Initial breakdown pulses accompanied by VHF pulses during negative cloud-to-ground lightning flashes, Geophysical Research Letters, 46 (10) (2019) 5592–5600, DOI: 10.1029/2019GL082488

[12] **Liu N.Y., Scholten O., Hare B.M., Dwyer J.R., Sterpka C.F., Kolmašová I., Santolík O.** LOFAR observations of lightning initial breakdown pulses, Geophysical Research Letters, 49 (6) (2022) e2022GL098073, DOI: 10.1029/2022GL098073

[13] **Wu T., Yoshida S., Akiyama Y., Stock M., Ushio T., Kawasaki Z.** Preliminary breakdown of intracloud lightning: initiation altitude, propagation speed, pulse train characteristics, and step length estimation, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120 (18) (2015) 9071–9086, DOI: 10.1002/2015JD023546

[14] **Rakov V.A., Tran M.D., Zhu Y., Ding Z., Leal A.F.R., Kereszy I., Chen S.** New insights into the lightning discharge processes, Plasma Sources Science and Technology, 31 (2022) 104005, DOI: 10.1088/1361-6595/ac9330

[15] **Иудин Д.И., Сысоев А.А., Раков В.А.** Проблемы инициации и развития молнии // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 11. С. 867–894. DOI: 10.52452/00213462_2021_64_11_867

[16] **Nag A., Rakov V.A.** A unified engineering model of the first stroke in downward negative lightning, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121 (5) (2016) 2188–2204, DOI: 10.1002/2015JD023777

[17] **Kostinskiy A.Yu., Marshall T.C., Stolzenburg M.** The mechanism of the origin and development of lightning from initiating event to initial breakdown pulses (v.2), Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (22) (2020) e2020JD033191, DOI: 10.1029/2020JD033191

[18] **Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A., Rakov V.A.** Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (7) (2020) e2019JD031360, DOI: 10.1029/2019JD031360

[19] **Kostinskiy A.Yu., Bogatov N.A., Syssoev V.S., Mareev E.A., Andreev M.G., Bulatov M.U., Sukharevsky D.I., Rakov V.A.** Unusual plasma formations produced by positive streamers entering the cloud of negatively charged water droplets, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127 (21) (2022) e2021JD035821, DOI: 10.1029/2021JD035821

[20] **Carlson B.E., Liang C., Bitzer P., Christian H.** Time domain simulations of preliminary breakdown pulses in natural lightning, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120 (11) (2015) 5316–5333, DOI: 10.1002/2014JD022765

[21] **Da Silva C.L., Pasko V.P.** Physical mechanism of initial breakdown pulses and narrow bipolar events in lightning discharges, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120 (10) (2015) 4989–5009, DOI: 10.1002/2015JD023209

[22] **Трахтенгерц В.Ю.** О природе электрических ячеек в грозовом облаке // Доклады академии наук СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 584–586.

[23] **Мареев Е.А., Сорокин А.Е., Трахтенгерц В.Ю.** Эффекты коллективной зарядки в многопотоковой аэрозольной плазме // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 3. С. 289–300.

[24] Thermopedia. Atmosphere (physical properties of), Режим доступа: https://www.thermopedia.com/content/570/, DOI: 10.1615/AtoZ.a.atmosphere_physical_properties_of (дата обращения: 15.10.2024)

[25] **Иудин Д.И., Сысоев А.А., Раков В.А.** Инициация молнии как следствие естественной эволюции грозового облака. Ч. 2. Достримерный этап // Электричество. 2022. № 12. С. 13–22. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-12-13-22

[26] **Mikropoulos P.N., Stassinopoulos C.A., Sarigiannidou B.C.** Positive streamer propagation and breakdown in air: the influence of humidity, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15 (2) (2008) 416–425, DOI: 10.1109/TDEI.2008.4483460

[27] **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.

[28] **Starikovskiy A.Yu., Aleksandrov N.L.** How pulse polarity and photoionization control streamer discharge development in long air gaps, Plasma Sources Science and Technology, 29 (7) (2020) 075004, DOI: 10.1088/1361-6595/ab9484

[29] **Nijdam S., Teunissen J., Ebert U.** The physics of streamer discharge phenomena, Plasma Sources Science and Technology, 29 (10) (2020) 103001, DOI: 10.1088/1361-6595/abaa05

[30] **D'Angola A., Colonna G., Gorse C., Capitelli M.** Thermodynamic and transport properties in equilibrium air plasmas in a wide pressure and temperature range, The European Physical Journal D, 46 (2008) 129–150, DOI: 10.1140/epjd/e2007-00305-4

[31] **Naghizadeh-Kashani Y., Cressault Y., Gleizes A.** Net emission coefficient of air thermal plasmas, Journal of Physics D: Applied Physics, 35 (22) (2002) 2925, DOI: 10.1088/0022-3727/35/22/306

[32] **Maslowski G., Rakov V.A.** A study of the lightning channel corona sheath, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111 (D14) (2006) D14110, DOI: 10.1029/2005JD006858

[33] **Gao Y., Chen M., Lyu W., Qi Q., Qin Z., Du Y., Zhang Y.** Leader charges, currents, ambient electric fields, and space charges along downward positive leader paths retrieved from ground measurements in metropolis, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (19) (2020) e2020JD032818, DOI: 10.1029/2020JD032818

[34] **Syssoev A.A., Iudin D.I., Karashtin A.N., Shlyugaev Yu.V.** Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 221 (2021) 105686, DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105686

[35] **Сысоев А.А., Иудин Д.И. Раков В.А., Емельянов А.А., Климашов В.Ю., Коровкин Н.В.** Численное моделирование сильноточных атмосферных разрядов с учетом термодинамики плазменных каналов. Ч. 1. Описание модели // Глобальная энергия. 2023. Т. 29. № 4. С. 50–71. DOI: 10.18721/JEST.29403

[36] **Сысоев А.А., Иудин Д.И. Раков В.А., Емельянов А.А., Климашов В.Ю., Коровкин Н.В.** Численное моделирование сильноточных атмосферных разрядов с учетом термодинамики плазменных каналов. Ч. 2. Анализ результатов моделирования // Глобальная энергия. 2024. Т. 30. № 1. С. 117–135. DOI: 10.18721/JEST.30107

[37] **Иудин Д.И., Сысоев А.А., Раков В.А.** Инициация молнии как следствие естественной эволюции грозового облака. Ч. 3. Стримеры и стримерно-лидерный переход // Электричество. 2023. № 1. С. 16–27. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-1-16-27

[38] **Jiang R., Lyu W., Wu B., Qi Q., Ma Y., Su Z., Wu S., Xie Z., Tan Y.** Simulation of cloud-to-ground lightning strikes to structures based on an improved stochastic lightning model, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 203 (2020) 105274, DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105274

[39] **Xu D., Tan Y., Zheng T., Lin H., Shi Z., Lei Y., Liu M., Wang H., Yu J.** Numerical simulation on the effects of the horizontal charge distribution on lightning types and behaviors, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126 (18) (2021) e2020JD034375, DOI: 10.1029/2020JD034375

[40] **Zheng T., Tan Y., Wang H., Shi Z., Lyu W., Wu B., Zhang Y.** A self-sustained charge neutrality intracloud lightning parameterization containing channel decay and reactivation, Geophysical Research Letters, 49 (23) (2022) e2022GL100849, DOI: 10.1029/2022GL100849

[41] **Lin Y., Tan Y., Yu J., Qi Q., Wu B., Lyu W.** Research on the initiation of multiple upward leaders from an isolated building based on an improved lightning attachment model, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 129 (2) (2024) e2023JD039336, DOI: 10.1029/2023JD039336

[42] **Iudin D.I., Syssoev A.A., Iudin F.D., Emelyanov A.A., Zhavoronkov I.Yu., Prudnikova E.Yu.** Numerical simulation of reversal point dynamics in intracloud lightning: Back-and-forth promoting effect, Atmospheric Research, 310 (2024) 107647, DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107647

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЫСОЕВ Артем Андреевич – *научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), канд. физ.-мат. наук.*
E-mail: asysoev@ipfran.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8786-6744

ИУДИН Дмитрий Игоревич – *ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), д-р физ.-мат. наук.*
E-mail: iudin@ipfran.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8416-9377

КОРОВКИН Николай Владимирович – *заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1173-8727

ЕМЕЛЬЯНОВ Алексей Александрович – *младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), без степени.*
E-mail: leshiysoft@yandex.ru

ЖАВОРОНКОВ Илья Юрьевич – *лаборант-исследователь, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), без степени.*
E-mail: ilya13201320@gmail.com

REFERENCES

[1] **V.A. Rakov, M.A. Uman,** Lightning: Physics and effects, Cambridge University Press, New York, 2003, 687 p.

[2] **R. Chapman, T. Marshall, S. Karunarathne, M. Stolzenburg,** Initial electric field changes of lightning flashes in two thunderstorms, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122 (7) (2017) 3718–3732, DOI: 10.1002/2016JD025859

[3] **E.M. Smith, T.C. Marshall, S. Karunarathne, R. Siedlecki, M. Stolzenburg,** Initial breakdown pulse parameters in intracloud and cloud-to-ground lightning flashes, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123 (4) (2018) 2129–2140, DOI: 10.1002/2017JD027729

[4] **N. Karunarathne, T.C. Marshall, S. Karunarathne, M. Stolzenburg,** Studying sequences of initial breakdown pulses in cloud-to-ground lightning flashes, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (3) (2020) e2019JD032104, DOI: 10.1029/2019JD032104

[5] **A. Nag, B.A. DeCarlo, V.A. Rakov,** Analysis of microsecond- and submicrosecond-scale electric field pulses produced by cloud and ground lightning discharges, Atmospheric Research, 91 (2–4) (2009) 316–325, DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.01.014

[6] **D. Petersen, W. Beasley,** High-speed video observations of the preliminary breakdown phase of a negative cloud-to-ground lightning flash, XV International Conference on Atmospheric Electricity, (2014) 1–10, DOI: 10.13140/RG.2.1.1333.9044

[7] **J.W. Belz et al.,** Observations of the origin of downward terrestrial gamma-ray flashes, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (23) (2020) e2019JD031940, DOI: 10.1029/2019JD031940

[8] **C. Gomes, V. Cooray,** Radiation field pulses associated with the initiation of positive cloud to ground lightning flashes, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66 (12) (2004) 1047–1055, DOI: 10.1016/j.jastp.2004.03.015

[9] **M. Stolzenburg, T.C. Marshall, S. Karunarathne, N. Karunarathna, R.E. Orville,** Leader observations during the initial breakdown stage of a lightning flash, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119 (21) (2014) 12,198–12,221, DOI: 10.1002/2014JD021994

[10] **F. Lyu, S.A. Cummer, L. McTague,** Insights into high peak current in-cloud lightning events during thunderstorms, Geophysical Research Letters, 42 (16) (2015) 6836–6843, DOI: 10.1002/2015GL065047

[11] **I. Kolmasova, T. Marshall, S. Bandara, S. Karunarathne, M. Stolzenburg, N. Karunarathne, R. Siedlecki,** Initial breakdown pulses accompanied by VHF pulses during negative cloud-to-ground lightning flashes, Geophysical Research Letters, 46 (10) (2019) 5592–5600, DOI: 10.1029/2019GL082488

[12] **N.Y. Liu, O. Scholten, B.M. Hare, J.R. Dwyer, C.F. Sterpka, I. Kolmašová, O. Santolík,** LOFAR observations of lightning initial breakdown pulses, Geophysical Research Letters, 49 (6) (2022) e2022GL098073, DOI: 10.1029/2022GL098073

[13] **T. Wu, S. Yoshida, Y. Akiyama, M. Stock, T. Ushio, Z. Kawasaki,** Preliminary breakdown of intracloud lightning: initiation altitude, propagation speed, pulse train characteristics, and step length estimation, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120 (18) (2015) 9071–9086, DOI: 10.1002/2015JD023546

[14] **V.A. Rakov, M.D. Tran, Y. Zhu, Z. Ding, A.F.R. Leal, I. Kereszy, S. Chen,** New insights into the lightning discharge processes, Plasma Sources Science and Technology, 31 (2022) 104005, DOI: 10.1088/1361-6595/ac9330

[15] **D.I. Iudin, A.A. Syssoev, V.A. Rakov,** Problems of lightning initiation and development, Radiophysics and Quantum Electronics, 64 (2022) 780–803, DOI: 10.52452/00213462_2021_64_11_867

[16] **A. Nag, V.A. Rakov,** A unified engineering model of the first stroke in downward negative lightning, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121 (5) (2016) 2188–2204, DOI: 10.1002/2015JD023777

[17] **A.Yu. Kostinskiy, T.C. Marshall, M. Stolzenburg,** The mechanism of the origin and development of lightning from initiating event to initial breakdown pulses (v.2), Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (22) (2020) e2020JD033191, DOI: 10.1029/2020JD033191

[18] **A.A. Syssoev, D.I. Iudin, A.A. Bulatov, V.A. Rakov,** Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (7) (2020) e2019JD031360, DOI: 10.1029/2019JD031360

[19] **A.Yu. Kostinskiy, N.A. Bogatov, V.S. Syssoev, E.A. Mareev, M.G. Andreev, M.U. Bulatov, D.I. Sukharevsky, V.A. Rakov,** Unusual plasma formations produced by positive streamers entering the cloud of negatively charged water droplets, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127 (21) (2022) e2021JD035821, DOI: 10.1029/2021JD035821

[20] **B.E. Carlson, C. Liang, P. Bitzer, H. Christian,** Time domain simulations of preliminary breakdown pulses in natural lightning, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120 (11) (2015) 5316–5333, DOI: 10.1002/2014JD022765

[21] **C.L. da Silva, V.P. Pasko,** Physical mechanism of initial breakdown pulses and narrow bipolar events in lightning discharges, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120 (10) (2015) 4989–5009, DOI: 10.1002/2015JD023209

[22] **V.Yu. Trahtengerts,** O prirode elektricheskikh yacheyek v grozovom oblake [On the nature of electrical cells in a thundercloud], Doklady Akademii Nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 308 (3) (1989) 584–586

[23] **E.A. Mareev, A.E. Sorokin, V.Yu. Trakhtengerts,** Effects of collective charging in a multiflow aerosol plasma, Plasma Physics Reports, 25 (3) (1999) 289–300

[24] Thermopedia. Atmosphere (physical properties of), Available: https://www.thermopedia.com/content/570/, DOI: 10.1615/AtoZ.a.atmosphere_physical_properties_of (Accessed: 15.10.2024)

[25] **D.I. Iudin, A.A. Syssoev, V.A. Rakov,** Lightning Initiation as a Consequence of Natural Thundercloud Evolution. Part 2. Pre-Streamer Stage, Elektrichestvo [Electricity], 12 (2022) 13–22, DOI: 10.24160/0013-5380-2022-12-13-22

[26] **P.N. Mikropoulos, C.A. Stassinopoulos, B.C. Sarigiannidou,** Positive streamer propagation and breakdown in air: the influence of humidity, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15 (2) (2008) 416–425, DOI: 10.1109/TDEI.2008.4483460

[27] **E.M. Bazelian, Iu.P. Raizer,** Fizika molnii i molniezashchity. Moscow: Fizmatlit, 2001. 320 p.

[28] **A.Yu. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov,** How pulse polarity and photoionization control streamer discharge development in long air gaps, Plasma Sources Science and Technology, 29 (2020) 075004, DOI: 10.1088/1361-6595/ab9484

[29] **S. Nijdam, J. Teunissen, U. Ebert,** The physics of streamer discharge phenomena, Plasma Sources Science and Technology, 29 (10) (2020) 103001, DOI: 10.1088/1361-6595/abaa05

[30] **A. D'Angola, G. Colonna, C. Gorse, M. Capitelli,** Thermodynamic and transport properties in equilibrium air plasmas in a wide pressure and temperature range, The European Physical Journal D, 46 (2008) 129–150, DOI: 10.1140/epjd/e2007-00305-4

[31] **Y. Naghizadeh-Kashani, Y. Cressault, A. Gleizes,** Net emission coefficient of air thermal plasmas, Journal of Physics D: Applied Physics, 35 (22) (2002) 2925, DOI: 10.1088/0022-3727/35/22/306

[32] **G. Maslowski, V.A. Rakov,** A study of the lightning channel corona sheath, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111 (D14) (2006) D14110, DOI: 10.1029/2005JD006858

[33] **Y. Gao, M. Chen, W. Lyu, Q. Qi, Z. Qin, Y. Du, Y. Zhang,** Leader charges, currents, ambient electric fields, and space charges along downward positive leader paths retrieved from ground measurements in metropolis, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (19) (2020) e2020JD032818, DOI: 10.1029/2020JD032818

[34] **A.A. Syssoev, D.I. Iudin, A.N. Karashtin, Yu.V. Shlyugaev,** Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 221 (2021) 105686, DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105686

[35] **A.A. Sysoev, D.I. Iudin, V.A. Rakov et al.,** Numerical simulation of high-current atmospheric discharges with consideration of plasma channel thermodynamics. Part 1. Model description, Global Energy, 29 (04) (2023) 50–71, DOI: 10.18721/JEST.29403

[36] **A.A. Sysoev, D.I. Iudin, V.A. Rakov et al.,** Numerical simulation of high-current atmospheric discharges with consideration of plasma channels thermodynamics. Part 2. Analysis of simulation results, Global Energy, 30 (01) (2024) 117–135, DOI: 10.18721/JEST.30107

[37] **D.I. Iudin, A.A. Syssoev, V.A. Rakov,** Lightning initiation as a consequence of natural thundercloud evolution. Part 3. Streamers and transition from streamers to a leader channel, Elektrichestvo [Electricity], 1 (2023) 16–27, DOI: 10.24160/0013-5380-2023-1-16-27

[38] **R. Jiang, W. Lyu, B. Wu, Q. Qi, Y. Ma, Z. Su, S. Wu, Z. Xie, Y. Tan,** Simulation of cloud-to-ground lightning strikes to structures based on an improved stochastic lightning model, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 203 (2020) 105274, DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105274

[39] **D. Xu, Y. Tan, T. Zheng, H. Lin, Z. Shi, Y. Lei, M. Liu, H. Wang, J. Yu,** Numerical simulation on the effects of the horizontal charge distribution on lightning types and behaviors, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126 (18) (2021) e2020JD034375, DOI: 10.1029/2020JD034375

[40] **T. Zheng, Y. Tan, H. Wang, Z. Shi, W. Lyu, B. Wu, Y. Zhang,** A self-sustained charge neutrality intracloud lightning parameterization containing channel decay and reactivation, Geophysical Research Letters, 49 (23) (2022) e2022GL100849, DOI: 10.1029/2022GL100849

[41] **Y. Lin, Y. Tan, J. Yu, Q. Qi, B. Wu, W. Lyu,** Research on the initiation of multiple upward leaders from an isolated building based on an improved lightning attachment model, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 129 (2) (2024) e2023JD039336, DOI: 10.1029/2023JD039336

[42] **D.I. Iudin, A.A. Syssoev, F.D. Iudin, A.A. Emelyanov, I.Yu. Zhavoronkov, E.Yu. Prudnikova,** Numerical simulation of reversal point dynamics in intracloud lightning: Back-and-forth promoting effect, Atmospheric Research, 310 (2024) 107647, DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107647

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Artem A. SYSSOEV – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS).*
E-mail: asysoev@ipfran.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8786-6744

Dmitry I. IUDIN – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS).*
E-mail: iudin@ipfran.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8416-9377

Nikolay V. KOROVKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1173-8727

Alexey A. EMELYANOV – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS).*
E-mail: leshiysoft@yandex.ru

Ilya Yu. ZHAVORONKOV – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS).*
E-mail: ilya13201320@gmail.com

Поступила: 15.10.2024; Одобрена: 20.03.2025; Принята: 20.03.2025.
Submitted: 15.10.2024; Approved: 20.03.2025; Accepted: 20.03.2025.

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 41–58.
Global Energy, 2025, 31 (1); 41–58.

Научная статья
УДК 621.315.624
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31103

К.В. Волхов[1] ✉ , *Д.Е. Титов*[1],
А.А. Кудрявцев[2], *Я.В. Ткачук*[3]

[1] Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия;
[2] ООО «Экспертный центр», Екатеринбург, Россия;
[3] ПАО «Россети Московский Регион», Москва, Россия

✉ K.Volkhov@skoltech.ru

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ПАО «РОССЕТИ МОСКОВСКИЙ РЕГИОН»

Аннотация. В статье представлены результаты испытаний технологии оценки состояния линейной изоляции, основанной на мониторинге параметров тока утечки в гирлянде изоляторов. Технология позволяет количественно оценить вероятность перекрытия гирлянд изоляторов и потери электроэнергии в них. Приведено описание реализующего технологию программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего съем осциллограмм тока утечки в трех фазах с дискретностью 1 мкс и метеопараметров в точке измерений тока утечки. Выявлены зависимости тока утечки от внешних факторов, а также степень увлажнения гирлянд изоляторов в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, изолирующая подвеска, загрязнения изолятора, перекрытие изолятора, ток утечки, устройство индикации состояния изоляции, потери электроэнергии.

Благодарности: Авторы выражают благодарность техническому директору АО «ЮАИЗ» Ефимову О.Н. и начальнику испытательного центра АО «ЮАИЗ» Мовсум-Заде Н.В. за помощь в проведении лабораторных испытаний демонтированных изоляторов.

Для цитирования:

Волхов К.В., Титов Д.Е., Кудрявцев А.А., Ткачук Я.В. Натурные испытания технологии оценки состояния линейной изоляции в ПАО «Россети Московский Регион» // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 41–58. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31103

© Волхов К.В., Титов Д.Е., Кудрявцев А.А., Ткачук Я.В., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31103

K.V. Volkhov[1] ✉ , *D.E. Titov*[1],
A.A. Kudryavtsev[2], *Ya.V. Tkachuk*[3]

[1] Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia;
[2] LLC "Expert Center", Yekaterinburg, Russia;
[3] PJSC "Rosseti Moscow Region", Moscow, Russia

✉ K.Volkhov@skoltech.ru

FIELD STUDIES OF THE TECHNOLOGY FOR ASSESSING THE CONDITION OF LINEAR INSULATION IN PJSC "ROSSETI MOSCOW REGION"

Abstract. The article presents the results of testing the technology for assessing the state of linear insulation based on monitoring the leakage current parameters in a string of insulators. The technology allows for a quantitative assessment of the probability of insulator string overlap and power loss in them. A description of the hardware and software complex implementing the technology is given, which ensures the removal of leakage current oscillograms in three phases with a discreteness of 1 μs and meteorological parameters at the point of leakage current measurements. The dependences of the leakage current on external factors, as well as the degree of moistening of insulator strings under operating conditions, are revealed.

Keywords: overhead power line, insulating suspension, insulator pollution, insulator flashover, leakage current, insulation condition indicator device, power loss.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the technical director of JSC Yuzhnouralsk reinforcement and insulator plant, O.N. Efimov, and the head of the testing center of JSC Yuzhnouralsk reinforcement and insulator plant, N.V. Movsum-Zade, for assistance in conducting laboratory tests of dismantled insulators.

Citation:

Volkhov K.V., Titov D.E., Kudryavtsev A.A., Tkachuk Ya.V., Field studies of the technology for assessing the condition of linear insulation in PJSC "Rosseti Moscow Region", Global Energy, 31 (01) (2025) 41–58, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31103

Введение. Большинство технологических нарушений в высоковольтных сетях приходится на воздушные линии электропередачи (далее – ВЛ). Высокая аварийность ВЛ связана с существенным природным и техногенным воздействием, а также с высокой степенью износа. Одной из основных причин аварийных отключений ВЛ является перекрытие загрязненной изоляции[1] [1].

Для снижения количества отключений по причине перекрытия загрязненных подвесок применяют их массовую или выборочную замену, руководствуясь результатами визуальных наблюдений, статистики перекрытий по фидерам и локациям, сопоставлением фактов аварий с находящимися поблизости источниками загрязнений.

Техническая политика ПАО «Россети»[2] и большинства сетевых компаний в мире [2–4] предполагает последовательный переход от системы планово-предупредительного оказания воздействия на активы к риск-ориентированному управлению (далее – РОУ). В России РОУ базируется

[1] Здесь и далее под изоляцией в зависимости от контекста подразумевается единичный изолятор, гирлянда изоляторов, изолирующая подвеска или их совокупность на опоре ВЛ, на ВЛ в целом, на всех обслуживаемых ВЛ.

[2] Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция). Режим доступа: https://www.rosseti.ru/upload/docs/tehpolitika_29.04.2022.pdf?ysclid=m5zd1ejdxt323573767 (дата обращения 16.01.2025).

© Volkhov K.V., Titov D.E., Kudryavtsev A.A., Tkachuk Ya.V., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

на расчете индекса технического состояния (далее – ИТС) и последующей оценки уровней технического риска[3].

Применительно к изоляции ВЛ для расчета ИТС используются данные визуальных осмотров. Поэтому загрязнение как параметр функционального узла – изоляции оценивается только качественно в терминах «стойкое», «нестойкое удаляемое» или «отсутствует»[4]. Такая градация значений параметра не позволяет количественно ранжировать изолирующие подвески по риску перекрытия. Более того, «на глаз» невозможно достоверно оценить стойкость загрязнения и связанный с ним риск перекрытия.

Существуют методы диагностики изоляторов с помощью портативных устройств, в том числе ультрафиолетовых (далее – УФ) приборов со счетчиками частичных разрядов и инфракрасных (далее – ИК) камер. Значимый недостаток данных методов связан с недостаточной разрешающей способностью устройств при наблюдении линейной изоляции с земли и может быть решен за счет использования беспилотного летательного аппарата винтокрылого типа. При этом главный недостаток этого способа диагностики – фиксация мгновенного состояния изоляции – сохраняется. УФ приборы и ИК камеры фиксируют частичные разряды или нагрев в определенных влажностных условиях и в определенную стадию процесса развития перекрытия. Через несколько минут или часов условия меняются, что приводит к изменению тока утечки и, как следствие, к изменению косвенных наблюдаемых параметров (число импульсов в единицу времени или градиент температур).

Другие методы диагностики, основанные на выявлении эквивалентной плотности отложений солей (ESDD) или плотности нерастворимых отложений (NSDD) [5], требуют отключения линии и удаления испытуемого изолятора, поэтому редко доказывают свою экономическую эффективность.

В последние десять лет все чаще публикуются материалы с результатами прямых измерений тока утечки в изоляции в условиях эксплуатации [6–9]. Данный факт связан с развитием технологий сенсорики и Internet of Things (IoT), а также с ростом возможностей собирать и обрабатывать большие объемы данных. При этом способы измерения (частота получения пакетов, дискретность измерений, пределы измерений, фиксируемый параметр тока утечки и т.д.), а также методы интерпретации результатов измерений значительно отличаются у разных авторов, но чаще всего сводятся к сравнению измеренного мгновенного значения одного из параметров тока с пороговым значением. Отсутствие общепринятого подхода к оценке состояния гирлянды по измеренному току утечки говорит о незрелости данной области техники.

Таким образом, принципы РОУ при управлении изоляцией ВЛ не могут быть реализованы в полной мере ввиду недостатка диагностических данных и несовершенства методик ранжирования по риску перекрытия. Для перехода на РОУ состоянием изоляции требуется разработка и внедрение инструментов, позволяющих сопоставлять состояние изоляции количественно и ранжировать ее по риску перекрытия.

АО «ЮАИЗ» и Сколковским институтом науки технологий разработана технология диагностирования линейной изоляции по току утечки. Совместные исследования в этой области были начаты в 2016 году. За это время были проведены лабораторные исследования поведения состояния изоляции с естественными загрязнениями [8], разработаны первые версии устройств индикации состояния изоляции (далее – УИС) [9] и проведены их натурные испытания на ВЛ 110 кВ в ПАО «МРСК Юга» и на ВЛ 330 кВ в ПАО «МЭС Юга» [10], построена математическая модель для оценки состояния изоляции по данным о токах утечки и приложенном к ней напряжении [11].

---

[3] Постановление Правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей».

[4] Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

В настоящей статье приведены результаты натурных и лабораторных испытаний технологии количественной оценки состояния гирлянды стеклянных изоляторов 110 кВ посредством измерений тока утечки.

Методы и материалы

Методика оценки состояния изолирующей подвески

Классификация состояний изолирующих подвесок базируется на сравнении выдерживаемого напряжения $U_{\text{В}}$ с фазным напряжением подвески $U_{\Ф}$ и последующим присвоением одного из трех состояний: хорошее, опасное, критическое. Кроме того, проводится расчет вероятности перекрытия подвески P для количественного сравнения состояния гирлянд между собой.

$U_{\text{В}}$ рассчитывается согласно А.1.2[5] с доверительной вероятностью 90%:

$$U_{\text{В}} = U'_{\text{ср}} \cdot \left(1 - 1{,}3 \cdot \sigma'\right), \tag{1}$$

где $U'_{\text{ср}}$ – нижнее значение среднего разрядного напряжения, кВ; σ' – наибольшее значение в относительных единицах стандартного отклонения в доверительном интервале при заданной точности определения σ.

Стандартное отклонение σ – сумма абсолютного оценочного значения стандартного отклонения разрядного напряжения при испытаниях z и стандартного отклонения оценки разрядного напряжения по току утечки $\sigma_{\text{м}}$ в математической модели ($\sigma_{\text{м}}$ принимается равным 23,6% [11]):

$$\sigma = z + \sigma_{\text{м}}. \tag{2}$$

Параметры $U'_{\text{ср}}$ и σ' определяются с доверительной вероятностью 90% с учетом числа приложения напряжения $N = 10$ при испытаниях методом 100%-го разряда на гирляндах из стеклянных изоляторов со следами естественных загрязнений. Подробнее испытания описаны в [11], они проводились с целью обучения модели оценки разрядного напряжения гирлянды по параметрам тока утечки.

$$U'_{\text{ср}} = \bar{U}_{\text{ср}} - 0{,}58\sigma, \tag{3}$$

где $\bar{U}_{\text{ср}}$ – оценочное значение среднего разрядного напряжения, кВ; 0,58 – численное значение $\frac{t_{\text{p}}}{\sqrt{N}}$ для доверительной вероятности 90% и $N = 10$.

$$\sigma' = \frac{1{,}645\sigma}{U_{\text{ср}}}, \tag{4}$$

где $U_{\text{ср}}$ – среднее разрядное напряжение, кВ; 1,645 – численное значение $\sqrt{\frac{N-1}{\chi^2_{\left(1-\frac{\text{p}}{2}\right)}}}$ для доверительной вероятности 90% и $N = 10$.

$U_{\text{ср}}$ принимается равным $U'_{\text{ср}}$ и определяется согласно [11]:

$$U_{\text{ср}} = U'_{\text{ср}} = \frac{U_{\Ф}}{\%U_{50\%}} \cdot 100, \tag{5}$$

[5] ГОСТ 1516.2-97 «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции».

где U_{Φ} – фазное напряжение ВЛ, кВ; $\%U_{50\%}$ – фазное напряжение, выраженное в % от оценочного значения 50%-го разрядного напряжения $\overline{U}_{50\%}$.

$\%U_{50\%}$ вычисляется по параметрам тока утечки согласно [11]:

$$\%U_{50\%} = 19,629 + 7,536 \cdot LN\left(I^{p}_{\max}\right) - 2,899 \cdot \left(I^{p}_{\max}\right)^{-1} + \\ + 0,138 \times I^{p}_{2\text{мА}-3\text{мА}} + 8,671 \cdot LG\left(I^{\sim}\right), \quad (6)$$

где $LN\left(I^{p}_{\max}\right)$ – натуральный логарифм от максимального пикового значения тока утечки I^{p}, полученного применением высокочастотного фильтра (алгебраическая разность исходного и сглаженного методом скользящего среднего сигналов) к осциллограмме тока утечки, полученной с дискретностью 1 мкс; $\left(I^{p}_{\max}\right)^{-1}$ – обратное значение от максимального значения выборки, полученной применением высокочастотного фильтра к осциллограмме тока утечки; $I^{p}_{2\text{мА}-3\text{мА}}$ – количество импульсов в выборке, полученной применением высокочастотного фильтра к осциллограмме тока утечки, амплитуда которых находится в диапазоне от 2 мА до 3 мА; $LG\left(I^{\sim}\right)$ – десятичный логарифм от амплитуды гармонической составляющей тока утечки $I^{\sim}$, полученной применением низкочастотного фильтра (сглаживанием исходного сигнала методом скользящего среднего) к осциллограмме тока утечки.

Аппроксимация (6) получена для гирлянд из пяти изоляторов наиболее распространенного типа ПС-70. При этом уравнение (6) не имеет параметров, связанных с количеством изоляторов в гирлянде и приложенным напряжением, что вытекает из методики лабораторных испытаний.

С повышением класса напряжения ВЛ количество изоляторов в гирлянде увеличивается практически линейно, а значит, приведенное к одному изолятору падение напряжения сохраняется. Поэтому частичные разряды, связанные с электрическими дужками, начинающимися и заканчивающимися на поверхности стеклодетали (например, между двумя каплями), не должны значительно изменяться по характеристикам. Коронные разряды как разновидность частичных становятся значительно интенсивнее на нижних изоляторах гирлянды при росте приложенного напряжения.

При разработке методики авторами были проведены предварительные исследования по определению оптимального количества изоляторов. Оно было определено, исходя из схожести процесса развития перекрытия трех, пяти, семи и девяти изоляторов (и, конечно, возможностей испытательной установки). При этом в ходе испытаний напряжение, при котором были получены осциллограммы, достигало 275 кВ, что близко к фазному напряжению ВЛ 500 кВ. Это позволяет предположить, что модель может быть применима для ВЛ любого класса напряжения с любым количеством изоляторов в гирлянде.

При сравнении подвесок между собой используются наименьшие достигнутые в ходе эксплуатации значения $\overline{U}_{50\%}$, соответствующие, как правило, наибольшей степени увлажнения поверхности изоляторов. На рис. 1 изображены соотношения между $U_{\text{В}}$ и U_{Φ} трех разных по степени загрязнения гирлянд.

При $U_{\text{В}} = U_{\text{В1}}$ вероятность перекрытия из-за накопленных загрязнений практически равна нулю. Изоляция находится в хорошем состоянии и не требует замены, так как:

$$k \cdot U_{\Phi} < \overline{U}_{50\%} - 3 \cdot \sigma, \quad (7)$$

где k принят равным 1,6 для ВЛ менее 100 км согласно EPRI AC Transmission Line Reference Book: 200 kV and Above (Red Book)[6].

[6] EPRI AC Transmission Line Reference Book: 200 kV and Above (Red Book). Режим доступа: https://www.epri.com/research/products/000000003002026982 (дата обращения 17.01.2025).

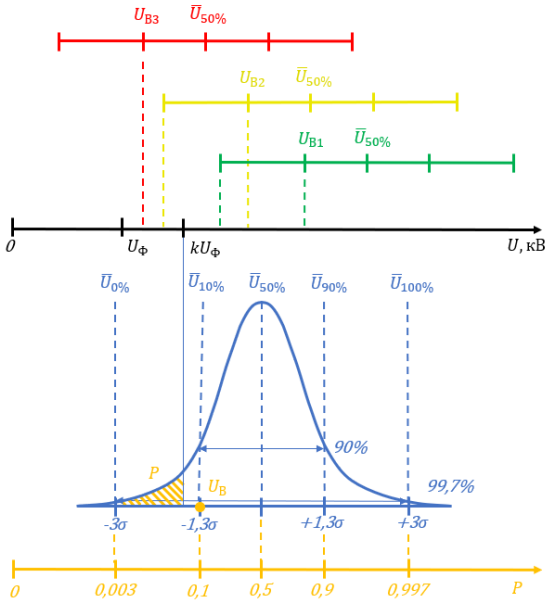


Рис. 1. Принцип классификации изолирующих подвесок

Fig. 1. Principle of classification of insulating suspensions

При $U_В = U_{В2}$ вероятность перекрытия становится значимой (но менее 0,1), изоляция находится в опасном состоянии и требует повышенного наблюдения, так как:

$$\bar{U}_{50\%} - 3 \cdot \sigma \le k \cdot U_Ф < \bar{U}_{50\%} - 1,3 \cdot \sigma. \quad (8)$$

При $U_В = U_{В3}$ вероятность перекрытия настолько высока (более 0,1), что изоляции присваивается статус критического состояния с необходимостью срочной замены, так как:

$$k \cdot U_Ф \ge \bar{U}_{50\%} - 1,3 \cdot \sigma. \quad (9)$$

Вероятность перекрытия P является количественной мерой оценки состояния изоляции и определяется через вычисление вероятности заданного отклонения:

$$P = \Phi\left(\frac{\bar{U}_{50\%} - k \cdot U_Ф}{\sigma}\right), \quad (10)$$

где Ф – функция Лапласа.

Алгоритм оценки состояния изоляции представлен на рис. 2.

Достигнутое и выявленное однажды опасное или критическое состояние изолирующей подвески «закрепляется» за ней на постоянной основе независимо от того, как часто регистрируется в дальнейшем, и может быть изменено в лучшую сторону только при замене, обмыве или чистке подвески, так как временное улучшение состояния вызвано, как правило, снижением степени увлажнения поверхности изоляторов, а не снижением проводимости загрязнений.

Потери электроэнергии за календарный месяц оцениваются следующим образом:

$$W = \sum_{i=0}^{N} \frac{\tilde{I}_i \cdot U_ф \cdot \Delta t_i}{\sqrt{2} \cdot 1000 \cdot 3600}, \quad (11)$$

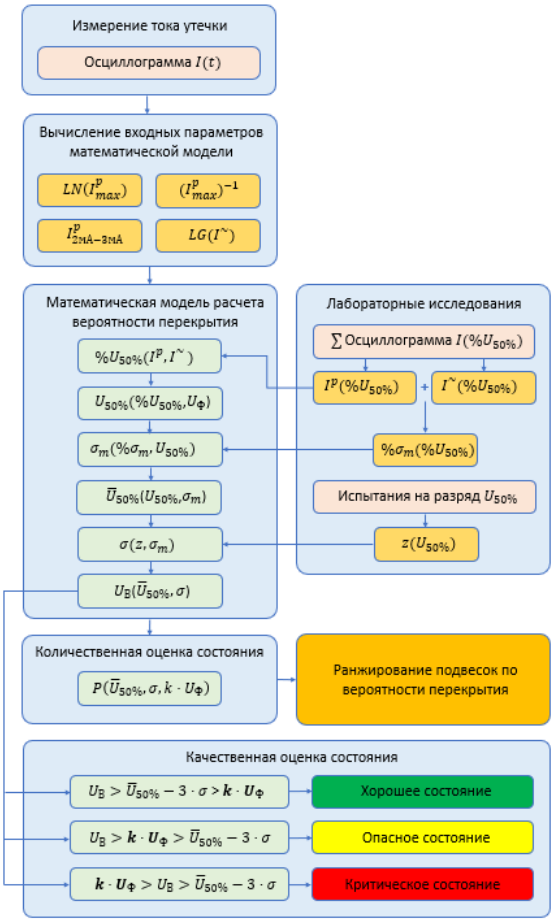


Рис. 2. Алгоритм оценки состояния изолирующей подвески

Fig. 2. Algorithm for assessing the condition of the insulating suspension

где W – потери электроэнергии за календарный месяц, кВт·ч/месяц; i – порядковый номер измерения $I^{\sim}$; N – количество измерений $I^{\sim}$ за расчетный месяц; I_i – мгновенное измеренное значение $I^{\sim}$, А, рассчитанное из осциллограммы, полученной с УИС; $U_ф$ – фазное напряжение ВЛ, равное 72,75 кВ для ВЛ 110 кВ (рассчитано как наибольшее рабочее напряжение 126 кВ, согласно ГОСТ Р 57382-2017, деленное на $\sqrt{3}$); Δt_i – время, прошедшее с момента получения предыдущего пакета с УИС, сек.

Техническая реализация технологии оценки состояния изоляции

Как было упомянуто выше, параметры тока утечки в гирлянде $LN\left(I^p_{\max}\right)$, $\left(I^p_{\max}\right)^{-1}$, $I^p_{2\text{мА}-3\text{мА}}$ и $LG\left(I^{\sim}\right)$ значительно изменяются во времени в зависимости от множества факторов, а значит, требуют постоянного мониторинга. Авторами не найдены на рынке устройства, способные снимать осциллограммы тока утечки с частотой 1 МГц в условиях эксплуатации ВЛ. Авторами был разработан программно-аппаратный комплекс диагностирования состояния изоляции (далее – Комплекс), способный обеспечить съем показаний токов утечки в трех фазах и метеопараметров в точке измерений тока утечки.

Аппаратная часть Комплекса состоит из автономных беспроводных УИС (рис. 3а), станции сбора и передачи данных на удаленный сервер, оснащенной метеодатчиками (далее – Станция, рис. 3б).

С заданным оператором интервалом, по команде со Станции, УИС выполняют синхронные измерения токов утечки на каждой из фаз ВЛ и передают результаты по радиоканалу в виде

а) б)

Рис. 3. а) УИС (слева); б) станция сбора и передачи данных (справа)
Fig. 3. a) Isolation status indication device (left); b) data collection and transmission station (right)

осциллограмм на Станцию. Станция дополняет измерения тока измерениями температуры и влажности воздуха, направления и скорости ветра и отправляет их на удаленный сервер посредством сотовой связи.

Основные параметры Комплекса представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики Комплекса

Table 1

Main technical characteristics of the Complex

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение параметра
Типы диагностируемых изоляторов	–	стеклянные, фарфоровые, полимерные
Номинальное напряжение ВЛ	кВ	110–500
Разрушающая нагрузка изолирующей подвески	кН	70–300
Погрешность измерения тока утечки: в диапазоне 0,025–5 мА в диапазоне 5–1000 мА	 мкА мА	 ±10 ±2
Диапазоны измерения тока утечки	мА	0,025...1000
Разрешение осциллограммы (дискретность)	мкс	1–200
Объем осциллограммы	периоды промышленной частоты 50 Гц	1–100
Периодичность опроса	мин.	1–360
Время автономной работы (без подзаряда аккумуляторов от солнечной панели)	мес.	не менее 3
Срок эксплуатации	годы	10

Полученные с УИС осциллограммы, а также результаты их обработки отображаются в клиентском программном обеспечении (далее – ПО) (рис. 4). Клиентское ПО – desktop-приложение для Windows – сигнализирует оператору о необходимости принятия точечных мер реагирования.

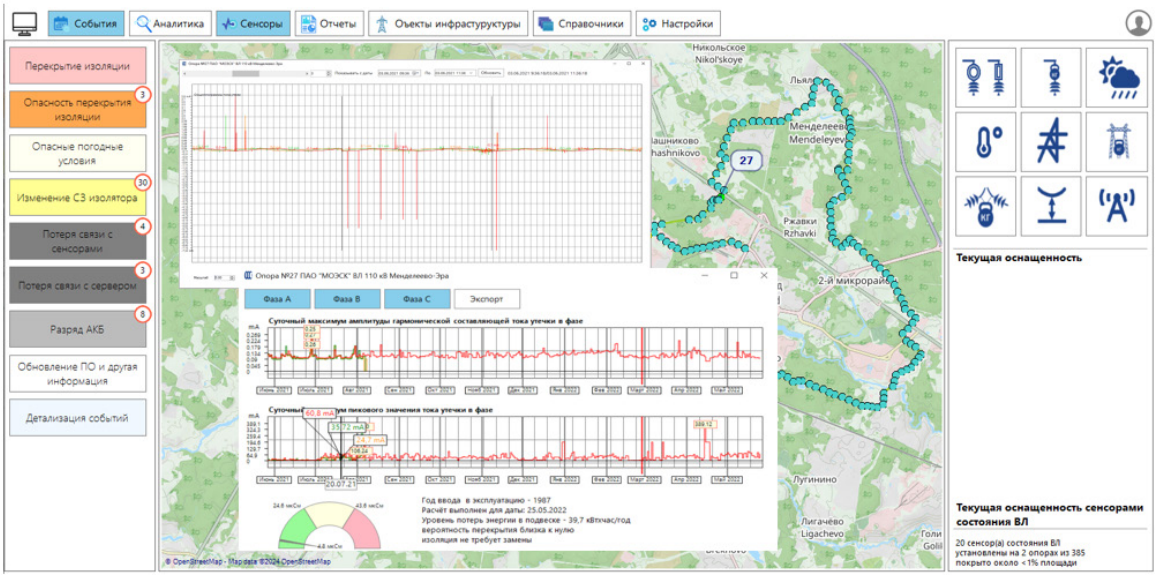


Рис. 4. Главное окно клиентского ПО с возможностью просмотра осциллограмм и графиков суточных максимумов амплитуды гармонической составляющей тока утечки и пикового значения тока утечки

Fig. 4. Main window of the client software with the ability to view oscillograms and graphs of daily maxima of the amplitude of the harmonic component of the leakage current and the peak value of the leakage current

Комплекс позволяет удаленно диагностировать изоляцию ВЛ под рабочим напряжением, что соответствует требованиям п. 2.5.1 Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция)[7].

Результаты

С целью выявления закономерностей в поведении изолирующих подвесок и проверки работоспособности УИС на ВЛ 110 кВ Комплекс был установлен на анкерную опору № 31 типа У100-2+5 ВЛ 110кВ «Менделеево – Эра» ПАО «Россети Московский Регион» (координаты: 56.02076999°N 37.188114523887°E) (рис. 5). Данная локация была выбрана в связи с непосредственной близостью к источнику загрязнения – Ленинградскому шоссе (96 метров на юго-запад от полотна дороги). УИС были установлены в натяжные изолирующие подвески трех фаз, состоящие из девяти изоляторов марки ПС-120 1987 года выпуска. При этом изолирующая подвеска фазы С была заменена на новую изоляторами той же марки. Изоляторы ПС-120 и ПС-70 имеют одинаковую стеклодеталь и, как следствие, одинаковую длину пути утечки и разрядные характеристики, отличаются лишь по механическим характеристикам, что позволяет применять формулу (6), полученную для изоляторов ПС-70, и для изоляторов ПС-120. Перечень параметров, по которым проводился анализ, представлен в табл. 2.

Годовой профиль токов утечки

Годовые графики $I^{\sim}$ и I^{p} представлены на рис. 6.

Зависимость токов утечки от внешних факторов

Анализ корреляции измерений токов утечки с погодными факторами показал, что наблюдался некоторый рост $I^{\sim}$ при увеличении относительной влажности воздуха (рис. 7).

Коэффициент детерминации экспоненциальной кривой, наилучшим образом отражающий тренд, составил 0,262 (при необходимом 0,5 и выше), что не позволяет использовать данные об относительной влажности воздуха для оценки состояния изоляции.

[7] Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция). Режим доступа: https://www.rosseti.ru/upload/docs/tehpolitika_29.04.2022.pdf?ysclid=m5zd1ejdxt323573767 (дата обращения 16.01.2025).

а)

б)

в)

Рис. 5. а) Процесс подготовки УИС к монтажу (слева вверху); б) УИС, установленное на изолирующей подвеске фазы С, состоящей их новых изоляторов (слева внизу); в) общий вид Комплекса после монтажа (справа)

Fig. 5. a) Process of preparing the insulation condition indicator device for installation (top left); b) insulation condition indicator device installed on the insulating suspension of phase C, consisting of new insulators (bottom left); c) general view of the Complex after installation (right)

Таблица 2

Перечень исследуемых параметров

Table 2

List of investigated parameters

№ п/п	Параметр	Источник данных	Примечание
1	Амплитуда гармонической составляющей токов утечки $I^{\sim}$	УИС	Входит в состав Комплекса
2	Пиковое значение токов утечки I^{p}	УИС	
3	Относительная влажность воздуха	Датчик относительной влажности воздуха	
4	Температура воздуха	Датчик температуры воздуха	
5	Скорость ветра	Датчик скорости ветра	
6	Направление ветра	Датчик направления ветра	
7	Время суток	Станция	
8	Время года	–	По календарю
9	Тип и интенсивность осадков	Внешний интернет-ресурс	https://rp5.ru

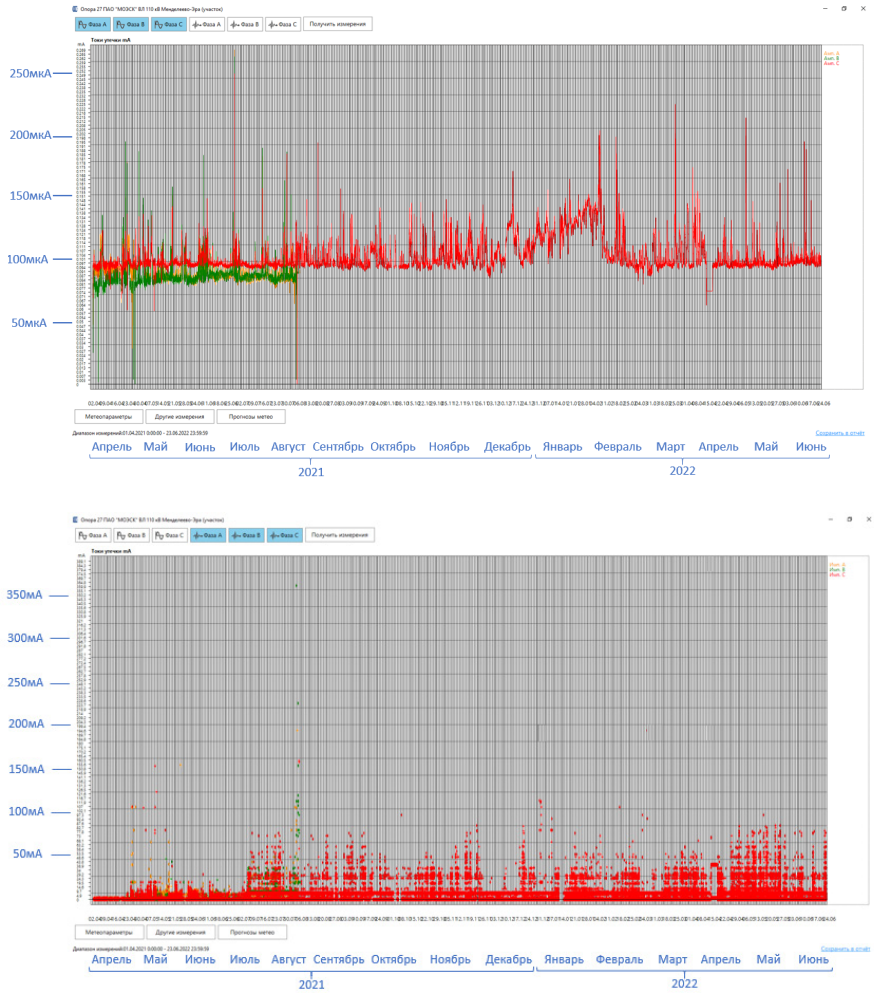


Рис. 6. Годовые графики $I^{\sim}$ и I^{p}

Fig. 6. Annual charts $I^{\sim}$ and I^{p}

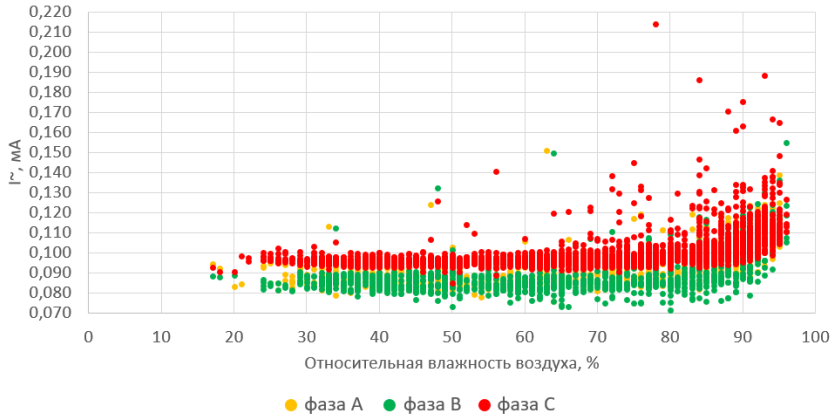


Рис. 7. График зависимости $I^{\sim}$ фаз A, B, C от относительной влажности воздуха при положительной температуре воздуха

Fig. 7. Graph of the dependence of $I^{\sim}$ phases A, B, C on relative humidity at a positive air temperature

Зависимость тока утечки от других измеряемых параметров погоды: температуры воздуха (в том числе от перехода через нулевую температуру), направления ветра, скорости ветра, а также от времени года, времени суток – не была подтверждена.

Единственный фактор, корреляция которого с током утечки была выявлена, – это интенсивность осадков. В качестве источника данных об осадках был выбран ресурс «Расписание погоды rp5» (метеостанция аэропорта Шереметьево, 15 км северо-восточнее от места установки Комплекса)[8], так как на этом ресурсе архивные данные об осадках были представлены наиболее полно (10 типов). Данные об осадках были синхронизированы по времени с данными о токах утечки. Для каждого типа осадков были рассчитаны средние значения $I^{\sim}$, наблюдаемые в период данного типа осадков. Типам осадков были присвоены ранги, отражающие способность осадков увлажнять поверхность изоляторов от наименьшей к наибольшей: нет осадков – 0, слабый снег – 1, умеренный снег – 2, сильный снег – 3, морось – 4, слабый дождь – 5, снег с дождем – 6, умеренный дождь – 7, роса – 8, сильный дождь – 9, ливень – 10. В результате были получены графики, представленные на рис. 8.

На рис. 8 для фаз А и В отсутствуют значения $I^{\sim}$ для осадков типа 1–3, так как в период работоспособности УИС фазы А и УИС фазы В данные типы осадков (снег) не наблюдались. $I^{\sim}$ фазы С при отсутствии осадков (интенсивность 0) выше I^~ фаз А и В, но по мере увеличения интенсивности осадков темпы роста $I^{\sim}$ фаз А и В превышают темп роста $I^{\sim}$ фазы С. Выявленная закономерность объясняется тем, что подвеска фазы С находится в эксплуатации значительно меньшее время и, как следствие, имеет значительно меньше загрязнений на поверхности.

Потери электроэнергии

Потери электроэнергии с разбивкой по месяцам, а также средние значения потерь по каждой из фаз за 4 месяца и за весь период исследований представлены на рис. 9.

Потери на гирлянде фазы С, состоящей из новых изоляторов, за период работоспособности всех УИС выше потерь на изоляции фазы А на 12,2% и на 14,8% выше потерь на изоляции фазы В.

С апреля по июль осадки наблюдались 1/4 дней, в то время как за период с ноября 2021 года по февраль 2022 года осадки наблюдались значительно чаще – 2/3 дней. Это позволяет предположить, что годовые потери на подвесках фаз А и В могли быть выше годовых потерь на подвеске фазы С за счет неучтенных периодов с высокой интенсивностью осадков.

Лабораторные испытания демонтированных изоляторов

После проведения измерений токов утечки на опоре № 31 ВЛ 110 кВ «Менделеево – Эра» были демонтированы изоляторы трех фаз для проведения исследований в высоковольтной лаборатории АО «ЮАИЗ». Цель исследований – оценка степени увлажнения гирлянд изоляторов в условиях эксплуатации.

Измерения токов утечки выполнялись при помощи УИС и последовательно установленного осциллографа Micsig Tbook 1004 на увлажненном единичном изоляторе при напряжении 7 кВ (рис. 10). Испытательное напряжение получено делением фазного напряжения ВЛ 110 кВ, равного 63,5 кВ, на количество изоляторов в гирлянде – девять штук. Для подачи испытательного напряжения использовалась высоковольтная установка УИВ-500. Увлажнение гирлянды проводилось методом росообразования на предварительно охлажденном изоляторе.

Результаты измерений $I^{\sim}$ осциллографом и УИС совпали и составили 0,598 мА. После измерения токов была проведена серия испытаний методом 100%-го разряда для расчета $U_{в}$ согласно методике ГОСТ 1516.2-97, приложение А. Сравнение результатов натурных и лабораторных измерений по изоляторам фаз А, В и С ВЛ 110 кВ «Менделеево – Эра» представлено в табл. 3.

[8] Архив погоды в Шереметьево / им. А. С. Пушкина (аэропорт). Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Шереметьево,_им._А._С._Пушкина_(аэропорт) (дата обращения: 16.09.2023).

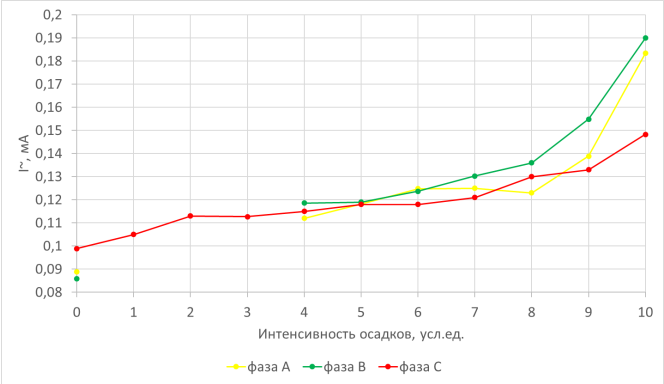


Рис. 8. График зависимости $I^{\sim}$ фаз A, B, C от интенсивности осадков

Fig. 8. Graph of the dependence of $I^{\sim}$ phases A, B, C on the intensity of precipitation

Таблица 3

Результаты натурных исследований и лабораторных измерений

Table 3

Results of field studies and laboratory measurements

№ п\п	Параметр	Ед. изм.	Данные натурных исследований			Данные лабораторных испытаний		
			фаза А	фаза В	фаза С	фаза А	фаза В	фаза С
1	$I^{\sim}_{max}$	мА	0,269	0,263	0,250	0,598	0,533	0,475
2	$U_{В}$	кВ	388	390	396	274	312	336

Обсуждение

График $I^{\sim}$ на рис. 6 имеет резкопеременный характер. Большую часть времени значения $I^{\sim}$ находились на уровне 90±5 мкА и за 14 месяцев исследований повысились до 95±5 мкА. Периодически $I^{\sim}$ повышалась на непродолжительное время до 270 мкА с последующим снижением.

Интерес представляет период с декабря по февраль, в котором зафиксировано несколько событий повышения $I^{\sim}$ до 200 мкА с задержкой на достигнутом уровне на несколько часов. Данный факт можно объяснить применением химических реагентов для очистки рядом расположенной трассы от снега и наледи. Влага с солью поднимается вверх от проезжающих машин и оседает на гирляндах, значительно изменяя ток утечки.

Импульсная активность за период исследований увеличилась более чем в два раза – среднее значение I^{p} повысилось с 1,16 мА до 2,92 мА, а среднее количество импульсов за сутки увеличилось с 5,4 до 12,5.

Максимальное значение I^{p} – 361 мА – зафиксировано 4 августа 2021 года на фазе В. В этот же день было зафиксировано максимальное значение I^{p} а на фазе А – 194 мА, после чего произошел отказ УИС фаз А и В. Данный факт свидетельствует о необходимости реализации дополнительных мер по защите измерительной схемы УИС от импульсов тока, что было учтено при последующей модернизации сенсоров.

Наименьшее за период исследований значение выдерживаемого напряжения $U_{В}$, рассчитанное по формулам (1–6), было зафиксировано 28 июня 2021 года в 14 часов 8 минут на фазе А и составило 388 кВ, что значительно выше фазного напряжения. Поэтому даже в этот момент вероятность перекрытия гирлянд с УИС стремилась к нулю.

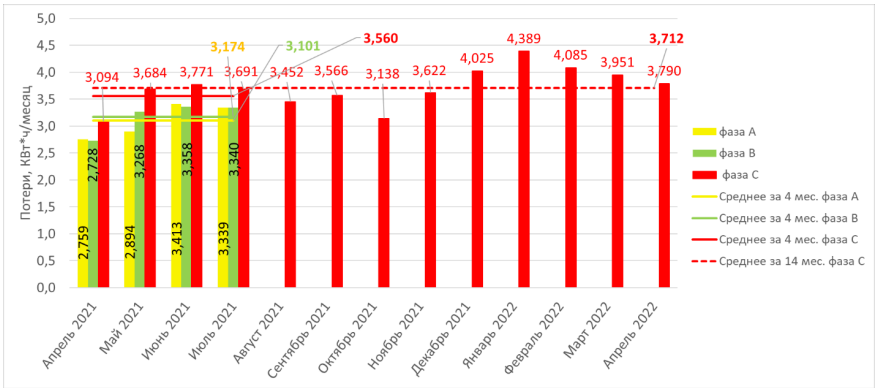


Рис. 9. Расчетные потери электроэнергии за период исследований

Fig. 9. Estimated power losses during the research period

В сухом состоянии усредненное $I^{\sim}$ фазы С выше $I^{\sim}$ фаз А и В более чем на 10%. Факт повышенного $I^{\sim}$ для новых изоляторов выявлен еще в 1973 году и описан в [12], где указано, что на стабилизацию характеристик новых изоляторов уходит 1,5–2 года. В увлажненном состоянии $I^{\sim}$ фазы С ниже $I^{\sim}$ фаз А и В более чем на 25%. Вероятность перекрытия определяется прежде всего значениями токов утечки в увлажненном состоянии, поэтому риск перекрытия изоляции фаз А и В будет выше риска перекрытия изоляции фазы С.

Усредненное значение I^{p} фазы С выше I^{p} фазы В на 20%, но ниже I^{p} фазы А на 45%. Из этого следует, что данный параметр сам по себе не является показательным для оценки состояния изоляции. Максимальное значение I^{p} фазы С ниже I^{p} фазы А на 60% и ниже I^{p} фазы В на 125%, т.е. I^{p} фазы С за весь период наблюдения не поднималось выше I^{p} фаз А и В. Импульсная активность фазы С в диапазоне до 30 мА сопоставима с остальными фазами, но за пределами этого диапазона заметно ниже.

Годовые потери на изолирующей подвеске фазы С составили 44,47 кВт·ч/год, что эквивалентно расходам сетевой компании в 89 руб./год при котловом тарифе на передачу электроэнергии в 2 руб./кВт·ч. При текущем уровне загрязнений и динамике их накопления только расходы на приобретение изоляторов для новой гирлянды 110 кВ окупятся примерно через $10000^{9}/89=112$ лет, поэтому замена гирлянды фазы С по критерию потерь электроэнергии не требуется.

Как видно из табл. 3, выдерживаемое напряжение $U_{\text{В}}$, рассчитанное по математической модели на основании данных УИС, установленных на ВЛ, в среднем на 20% выше полученного в лабораторных условиях. Это объясняется тем, что изоляция в реальных условиях эксплуатации за период исследований не достигала такой степени увлажнения, при которой проводились лабораторные испытания.

В ходе проведения натурных и лабораторных измерений была доказана работоспособность технологии оценки состояния изоляции на примере натяжной изолирующей подвески. В предстоящем этапе исследований будет уделено внимание поддерживающим подвескам из стеклянных и полимерных изоляторов, подверженным опасным для эксплуатации видам загрязнений.

Выводы

1. Разработана методика оценки состояния изолирующей подвески, основанная на сравнении расчетного выдерживаемого напряжения $U_{\text{В}}$ с фазным напряжением подвески $U_{\text{Ф}}$ и последующем присвоении одного из трех состояний: хорошее, опасное, критическое. Кроме того, проводится расчет вероятности перекрытия подвески для количественного сравнения состояния

[9] Стоимость одного изолятора ПС-70Е составляет около 1000 руб.

Рис. 10. Измерения токов утечки в лаборатории ЮАИЗ на демонтированных с ВЛ 110 кВ «Менделеево – Эра» изоляторах фазы А

Fig. 10. Measurements of leakage currents in the JSC Yuzhnouralsk reinforcement and insulator plant laboratory on phase A insulators dismantled from 110 kV Mendeleevo – Era overhead line

гирлянд между собой. Выдерживаемое напряжение оценивается на базе результатов мониторинга параметров тока утечки в гирлянде изоляторов.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс диагностирования состояния изоляции, способный обеспечить круглогодичный съем осциллограмм тока утечки в трех фазах с дискретностью 1 мкс и метеопараметров в точке измерений тока утечки. Комплекс состоит из автономных беспроводных устройств индикации состояния изоляции, станции сбора и передачи данных, оснащенной метеодатчиками, а также серверного и клиентского программного обеспечения.

3. Проведены испытания комплекса в натурных условиях на ВЛ «Менделеево – Эра» ПАО «Россети Московский Регион» в течение более 400 дней. В результате испытаний удалось снять около 200000 осциллограмм в разных погодных условиях на гирляндах с разной степенью загрязнения. Опыт организации автономных измерений токов утечки в гирляндах использовался для повышения качества измерителей.

4. Гармоническая и импульсная составляющие тока утечки имеют резко переменный характер и колеблются в диапазоне 85–270 мкА и 0–361 мА соответственно. Выявлены незначительная зависимость тока утечки от относительной влажности воздуха и отсутствие зависимости от температуры воздуха, направления ветра и скорости ветра, времени года и суток. Единственный фактор, корреляция которого с током утечки была выявлена, это интенсивность осадков. Зависимость тока утечки от интенсивности осадков растет с ростом загрязненности гирлянд.

5. Измерения тока утечки позволили выявить среднегодовые потери электроэнергии в гирлянде и получить рекомендации по замене гирлянд по критерию потерь электроэнергии.

6. В ходе лабораторных испытаний демонтированных изоляторов выявлено, что в процессе эксплуатации гирлянда не увлажнялась настолько сильно, как в лаборатории (условия росообразования на поверхности с подтеками капель). Минимальные расчетные выдерживаемые напряжения на гирляндах в эксплуатации и в лаборатории составили 388 кВ и 274 кВ соответственно, что значительно выше опасного и критического уровней. Вероятность перекрытия гирлянд на опоре № 31 ВЛ 110 кВ «Менделеево – Эра» в результате увлажнения накопленных загрязнений близка к нулю.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Титов Д.Е., Грязина Е.А., Пономарев Е.Ю., Лукичева И.А., Цитрин П.В.** Сценарная диагностика состояния воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. Т. 76, № 1. С. 92–101.

[2] **Alvarez-Alvarado M.S., Donaldson D.L., Recalde A.A., Noriega H.H., Khan Z.A., Velasquez W.** Power system reliability and maintenance evolution: A critical review and future perspectives // IEEE Access. 2022. Vol. 10. Pp. 51922–51950. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3172697

[3] **Mirhosseini M., Keynia F.** Asset management and maintenance programming for power distribution systems: A review // IET Generation, Transmission & Distribution. 2021. Vol. 15, No. 16. Pp. 2287–2297. DOI: 10.1049/gtd2.12177

[4] **O'Reilley C., King T. et al.** Electricity transmission system research and development: Hardware and components // Transmission Innovation Symposium: Modernizing the U.S. Electrical Grid. 2021. Pp. 54–55.

[5] Insulator pollution monitoring. CIGRE, 1994.

[6] **Liu Y., Du B.X., Farzaneh M.** Self-normalizing multivariate analysis of polymer insulator leakage current under severe fog conditions // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32, No. 3. Pp. 1279–1286. DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2650214

[7] **Dey U., Chandra M., Das S.** Insulator contamination diagnosis using unsupervised machine learning // 2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET). 2022. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/INCET54531.2022.9825221

[8] **Титов Д.Е., Волхов К.В., Кудрявцев А.А., Котоливцев В.В., Петренко С.А.** К вопросу диагностики линейной изоляции // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. Т. 45, № 6. С. 10–16.

[9] **Петренко С.А., Титов Д.Е.** Устройство (варианты) и способ определения состояния изолирующих подвесок. Пат. RU 2620021 C1 Российская Федерация. МПК G01R 31/12(2006.01); заявитель и патентообладатель ООО «МИГ». № 2015156834, 2015.12.29; заявл. 29.12.2015; опубл. 22.05.2017.

[10] **Глухов Д.А., Титов Д.Е., Волхов К.В., Кудрявцев А.А.** Результаты испытаний системы диагностики линейной изоляции по току утечки // IX Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи». 2018. С. 2–4.

[11] **Volkhov K.V., Titov D.E.** Diagnostics of overhead line insulator state based on leakage current regression analysis // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2023. Pp. 45–51. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139219

[12] **Мерхалев С.Д., Соломоник Е.А.** Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой. Ленинград: Энергия, 1973. 159 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОЛХОВ Клим Вячеславович – *инженер, Сколковский институт науки и технологий, без степени.*
E-mail: K.Volkhov@skoltech.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5525-4608

ТИТОВ Дмитрий Евгеньевич – *профессор, Сколковский институт науки и технологий, канд. техн. наук.*
E-mail: D.Titov@skoltech.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1755-6895

КУДРЯВЦЕВ Андрей Александрович – *главный инженер, ООО «Экспертный центр», без степени.*
E-mail: chief_engineer@exctr.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4790-5075

ТКАЧУК Яков Васильевич – *директор департамента эксплуатации сетей 35-500 кВ, ПАО «Россети Московский Регион», без степени.*
E-mail: TkachukYV@rossetimr.ru

REFERENCES

[1] **D.E. Titov, E.A. Gryazina, E.U. Ponomarev, I.A. Lukicheva, P.V. Tsitrin,** Scenario diagnosis of overhead transmission lines, Electric Power. Transmission and Distribution, 1 (76) (2023) 92–101.

[2] **M.S. Alvarez-Alvarado, D.L. Donaldson, A.A. Recalde, H.H. Noriega, Z.A. Khan, W. Velasquez,** Power system reliability and maintenance evolution: A critical review and future perspectives, IEEE Access, 10 (2022) 51922–51950. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3172697

[3] **M. Mirhosseini, F. Keynia,** Asset management and maintenance programming for power distribution systems: A review, IET Generation, Transmission & Distribution, 15 (16) (2021) 2287–2297. DOI: 10.1049/gtd2.12177

[4] **C. O'Reilley, T. King et al.,** Electricity transmission system research and development: Hardware and components, Transmission Innovation Symposium: Modernizing the U.S. Electrical Grid (2021) 54–55.

[5] Insulator pollution monitoring. CIGRE, 1994.

[6] **Y. Liu, B.X. Du, M. Farzaneh,** Self-normalizing multivariate analysis of polymer insulator leakage current under severe fog conditions, IEEE Transactions on Power Delivery, 32 (3) (2017) 1279–1286. DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2650214

[7] **U. Dey, M. Chandra, S. Das,** Insulator contamination diagnosis using unsupervised machine learning, 2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET), (2022) 1–6. DOI: 10.1109/INCET54531.2022.9825221

[8] **D.E. Titov, K.V. Volkhov, A.A. Kudriavtsev, V.V. Kotolivtsev, S.A. Petrenko,** K voprosu diagnostiki linejnoj izoliatsii [On the issue of diagnostics of linear insulation], Electric Power. Transmission and Distribution, 6 (45) (2017) 10–16.

[9] **S.A. Petrenko, D.E. Titov,** Device (versions) and procedure for determination of condition insulator sets, Russian Federation Patent, No. RU 2620021 C1 (2017).

[10] **D.A. Glukhov, D.E. Titov, K.V. Volkhov, A.A. Kudriavtsev,** Rezul'taty ispytanij sistemy diagnostiki linejnoj izoliatsii po toku utechki [Results of testing the system for diagnostics of linear insulation by leakage current] // IX Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaia konferentsiia "Elektroenergetika glazami molodezhi" [IX International Scientific and Technical Conference "Electric Power Engineering through the Eyes of Youth"], (2018) 2–4.

[11] **K.V. Volkhov, D.E. Titov,** Diagnostics of overhead line insulator state based on leakage current regression analysis, 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), (2023) 45–51. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139219

[12] **S.D. Merkhalev, E.A. Solomonik,** Izoliatsiia linii i podstantsii v raionakh s zagriaznennoi atmosferoi [Insulation of lines and substations in areas with polluted atmosphere]. Leningrad: Energiia, 1973. 159 p.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Klim V. VOLKHOV – *Skolkovo Institute of Science and Technology.*
E-mail: K.Volkhov@skoltech.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5525-4608

Dmitry E. TITOV – *Skolkovo Institute of Science and Technology.*
E-mail: D.Titov@skoltech.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1755-6895

Andrey A. KUDRYAVTSEV – *LLC "Expert Center"*.
E-mail: chief_engineer@exctr.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4790-5075

Yakov V. TKACHUK – *PJSC "Rosseti Moscow Region"*.
E-mail: TkachukYV@rossetimr.ru

Поступила: 12.10.2024; Одобрена: 12.01.2025; Принята: 13.01.2025.
Submitted: 12.10.2024; Approved: 12.01.2025; Accepted: 13.01.2025.

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 59–78.
Global Energy, 2025, 31 (1); 59–78.

Научная статья
УДК 620.4
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31104

А.Н. Рогалев, В.О. Киндра, И.И. Комаров, О.В. Злывко, Д.С. Ковалев ✉

Московский энергетический университет (НИУ МЭИ), Москва, Россия

✉ kov-d-s@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ТРИНАРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С МИНИМАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

Аннотация. На сегодняшний день большая часть электрической энергии в мире генерируется за счет сжигания углеводородного топлива, что обуславливает значительные выбросы вредных веществ в атмосферу тепловыми электрическими станциями (ТЭС). В мировой практике на энергетических объектах успешно применяются системы очистки дымовых газов от оксидов азота, серы и золы, однако уменьшение выбросов углекислого газа на ТЭС до сих пор затруднено по технико-экономическим причинам. Так, внедрение систем улавливания углекислого газа на современных энергетических станциях сопровождается снижением КПД нетто на 8–12%, что обуславливает высокую актуальность разработки способов повышения энергетической эффективности современных экологически безопасных энергоблоков. Цель работы заключается в разработке и исследовании парогазовых установок (ПГУ) с интегрированной установкой паровой конверсии метана с минимальными выбросами вредных веществ. В настоящей работе в ходе исследований было выявлено, что КПД нетто бинарной ПГУ с интегрированной технологией post-combustion capture равна 39,10%, бинарной ПГУ с интегрированной технологией pre-combustion capture – 40,26%, тринарной ПГУ с интегрированной технологией post-combustion capture – 40,35% и тринарной ПГУ с интегрированной технологией pre-combustion capture – 41,62%. Наибольшая эффективность тринарной ПГУ с интегрированной технологией pre-combustion capture обусловлена снижением затраты энергии на улавливание углекислого газа на 5,67 МВт относительно ПГУ с интегрированной технологией post-combustion capture и ростом эффективности пароводяного контура ПГУ на 3,09% относительно бинарных циклов.

Ключевые слова: парогазовые установки, паровая конверсия метана, термодинамический анализ, тепловые схемы, энергетическая эффективность.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Формирование научных основ создания неводородных углеродно-нейтральных и водородных энергетических комплексов» (FSWF-2023-0014, соглашение № 075-03-2023-383 от 18.01.2023).

Для цитирования:

Рогалев А.Н., Киндра В.О., Комаров И.И., и др. Разработка технологической схемы тринарной энергетической установки с минимальными выбросами вредных веществ в атмосферу // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 59–78. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31104

© Рогалев А.Н., Киндра В.О., Комаров И.И., и др., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31104

A.N. Rogalev, V.O. Kindra, I.I. Komarov, O.V. Zlyvko, D.S. Kovalev ✉

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

✉ kov-d-s@mail.ru

DEVELOPMENT OF A PROCESS FLOW DIAGRAM FOR A TRINARY POWER PLANT WITH MINIMAL EMISSIONS OF HARMFUL SUBSTANCES INTO THE ATMOSPHERE

Abstract. Today, most of the world's electric energy is generated by burning hydrocarbon fuels, which causes significant emissions of harmful substances into the atmosphere by thermal power plants (TPP). In world practice, power facilities successfully use systems for cleaning flue gas from nitrogen oxides, sulfur and ash, but reducing carbon dioxide emissions at TPP is still difficult for technical and economic reasons. Thus, the introduction of carbon dioxide capture systems at modern power plants is accompanied by a decrease in net efficiency by 8–12%, which determines the high relevance of developing methods for increasing the energy efficiency of modern environmentally friendly power units. The purpose of the work is to develop and study combined-cycle power plants with an integrated steam methane reforming unit with minimal emissions of harmful substances. In the present work, the research revealed that the net efficiency of a binary CCGT with integrated post-combustion capture technology is 39.10%, binary CCGT with integrated pre-combustion capture technology– 40.26%, trinary CCGT with integrated post-combustion capture technology– 40.35% and a trinary CCGT with integrated pre-combustion capture technology– 41.62%. The highest efficiency of a trinary CCGT with integrated pre-combustion capture technology is due to a decrease in energy costs for carbon dioxide capture by 5.67 MW relative to CCGT with integrated post-combustion capture technology, and an increase in the efficiency of the CCGT steam-water circuit by 3.09% relative to binary cycles.

Keywords: combined cycle plants, steam methane reforming, thermodynamic analysis, thermal schemes, energy efficiency.

Acknowledgements: The research was partially financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Formation of the scientific basis for the creation of non-hydrogen carbon-neutral and hydrogen energy complexes" (FSWF-2023-0014, agreement No. 075-03-2023-383 dated 01/18/2023).

Citation:

Rogalev A.N., Kindra V.O., Komarov I.I., et al., Development of a process flow diagram for a trinary power plant with minimal emissions of harmful substances into the atmosphere, Global Energy, 31 (01) (2025) 59–78, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31104

Введение

Проблема повышения энергетической эффективности и экологической безопасности производства электроэнергии на парогазовых установках

Мировое сообщество последние десятилетия уделяет повышенное внимание вопросам сокращения выбросов токсичных веществ и углекислого газа в атмосферу экономическим сектором [1, 2]. Для повышения экологической безопасности современных предприятий активно ведутся исследования и разработки новых технологий предотвращения образования и улавливания вредных выбросов. Однако, несмотря на определенные успехи в реализации способов уменьшения выбросов оксидов азота, серы и золы [3, 4], уменьшение выбросов углекислого газа в промышленности до сих пор затруднено по технико-экономическим причинам.

© Rogalev A.N., Kindra V.O., Komarov I.I., et al., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Энергетический сектор является одним из главных источников выбросов парниковых газов. К примеру, по последним данным в Российской Федерации на выработку электрической и тепловой энергии приходится 34,7% от всех антропогенных выбросов углекислого газа в атмосферу, что обуславливает крайнюю актуальность повышения экологической безопасности на тепловых электрических станциях (ТЭС) [5].

В тепловой энергетике применяются паротурбинные (ПТУ), газовые и парогазовые (ПГУ) установки. Согласно статистическим данным [6, 7], в Российской Федерации у парогазовых станций выбросы углекислого газа на 132 гCO_2/кВт меньше, чем у паротурбинных, а КПД нетто выше на 12,9%. Стоит отметить, что применение технологий улавливания диоксида углерода из дымовых газов для перечисленных энергоустановок приведет к существенному снижению их энергетической эффективности на 8–12%. Учитывая важность экономии топлива при производстве электроэнергии, при разработке низкоуглеродных энергетических комплексов целесообразно рассматривать модификации энергоэффективных циклов Брайтона–Ренкина [8].

Несмотря на то, что КПД ПГУ достигает рекордных значений, потенциал повышения их энергоэффективности существенный. В частности, возможна дополнительная выработка электрической энергии за счет утилизации теплоты дымовых газов в органическом цикле Ренкина (ОЦР). Рабочей средой для данных циклов служит низкокипящий теплоноситель с критической температурой от 30°С до 290°С. Однако из-за низкого теплового потенциала сбросной теплоты энергетическая эффективность ОЦР не превышает 15%, что дает прирост КПД нетто тринарной ПГУ не более 2–3% [8–10].

Способы улавливания углекислого газа на тепловых станциях

Для минимизации энергетических затрат на собственные нужды (СН) бинарных и тринарных ПГУ требуется разработать высокоэффективные способы улавливания углекислого газа. В настоящее время при производстве электроэнергии применяют два основных способа снижения выбросов диоксида углерода: до и после сжигания топлива (pre- и post-combustion capture соответственно) [12].

Улавливание CO_2 после сжигания топлива осуществляется из дымовых газов с помощью специальных устройств. Данный способ является наиболее распространенным в современной тепловой энергетике ввиду технологической простоты и малой стоимости осуществления процесса удаления углекислого газа. В настоящее время активно применяются криогенные, мембранные и абсорбционные методы улавливания углекислого газа [13].

Стоит отметить, что рассматриваемые технологии разделения газовой смеси обладают рядом достоинств и недостатков, однако из-за высокой степени улавливания (88–98%) и невысоких затрат энергии на СН (4–6 МДж/кг·CO_2) наиболее энергетически и экологически эффективной технологией post-combustion capture является установка моноэтаноламиновой очистки (МЭА) уходящих газов [14–16]. Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Одним из перспективных способов сокращения выбросов CO2 является его удаление из состава топлива (угля, нефти или природного газа) до сжигания, в результате которого в качестве конечного топлива выступает водород [12]. Для улавливания углекислого газа до сжигания топлива используются такие способы производства водородного топлива, как электролиз и пиролиз воды, паровая конверсия метана (ПКМ), автотермический риформинг метана или крекинг метана.

В настоящее время наиболее эффективной и дешевой технологией производства водородного топлива является установка ПКМ [17–19]. Процесс риформинга пара протекает в установке ПКМ при высоких температурах (650–900°С) и умеренных давлениях (1,5–2 кгс/см^2) парометанной смеси. В ходе эндотермической реакции метана и пара образуется синтез-газ, который в дальнейшем направляет в адсорбер переменного давления для разделения углекислотной и водородной среды.

Таблица 1

Сравнение энергетических и экологических характеристик технологий улавливания CO_2 после сжигания топлива

Table 1

Comparison of energy and environmental characteristics of post-combustion CO_2 capture technologies

Параметр	Метод улавливания CO_2		
	Абсорбция	Мембраны	Криогенное разделение
Затраты энергии, МДж/кгCO_2	4–6	0,5–6	6–10
Степень улавливания CO_2, %	88–98	80–90	>95

Современное состояние парогазовых энергетических циклов с интегрированными установками паровой конверсии метана

Существует множество научных работ, посвященных разработке бинарных парогазовых циклов с интегрированной установкой ПКМ [20–24]. К примеру, в статье [21] для генерации электроэнергии и водородного топлива авторами была рассмотрена ПГУ с интегрированной установкой ПКМ, которая встроена в газовоздушный контур на выходе из газовой турбины. С помощью выносной камеры сгорания продукты сгорания нагреваются до температуры 800–1000°С и направляются в риформер. Для уменьшения потерь с уходящими газами ПТУ выполнена без системы регенерации, из-за чего температура уходящих газов равняется 140°С. Коэффициент использования теплоты топлива данной энергоустановки изменяется от 56,2% до 64,1% в зависимости от температуры на входе в газовую турбину, которая изменяется в диапазоне от 1200°С до 1600°С. Стоит отметить, что в данной статье в камере сгорания сжигают водородное топливо, из-за чего продукты сгорания состоят из водяного пара, однако выбросы углекислого газа происходят в установке ПКМ.

Также существует вариант ПГУ с интегрированной установкой ПКМ, где реакции парового сдвига происходят только в высокотемпературном реакторе, а все оставшиеся попутные газы направляются в выносную камеру сгорания. Стоит отметить, что данная технология позволяет частично сократить выбросы углекислого газа за счет очистки дымовых газов с помощью моноэтаноламиновой абсорбции. При совместном производстве водородного топлива и электроэнергии коэффициент использования теплоты разработанного блока варьируется от 57% до 70% [22].

В статьях [23, 24] рассмотрена тепловая схема ПГУ с ПКМ, которая используется только для производства электроэнергии. Сам риформер, как и в статьях, рассмотренных ранее, располагается на выходе из газовой турбины. Водород, произведенный в ПКМ, подводится после абсорбера в камеру сгорания и печь риформера. Стоит отметить, что пар для реакции паровой конверсии отбирается из отбора турбины высокого давления. Избыточное тепло ПКМ утилизируется с помощью подогрева конденсата, который отбирают после конденсатора, до температуры питательной воды. При температуре на выходе из камеры сгорания, равной 1368°С, КПД нетто данной установки равняется 46,1%.

Упомянутые ранее варианты рассматривают только бинарные ПГУ, однако развитая система регенерации пароводяного контура тринарных ПГУ позволит существенно повысить энергетическую эффективность ТЭС. В итоге целью настоящей работы является разработка технологической схемы и математической модели тринарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ, а также аналитическое сравнение полученных результатов с существующими бинарными установками.

Объект исследований

Для сравнения тринарных и бинарных энергоустановок с технологиями улавливания углекислого газа post- и pre-combustion capture были рассмотрены следующие циклы:

1) бинарная ПГУ с МЭА уходящих газов (рис. 1);
2) тринарная ПГУ с МЭА уходящих газов (рис. 2);
3) бинарная ПГУ с интегрированной установкой ПКМ (рис. 3);
4) тринарная ПГУ с интегрированной установкой ПКМ (рис. 4).

Бинарная ПГУ с МЭА уходящих газов, представленная на рис. 1, работает следующим образом. В воздушном компрессоре (К) осуществляется процесс сжатия воздуха. Сжатый в компрессоре воздух подается в камеру сгорания (КС), в которую также с помощью газодожимного компрессора (ГДК) подается метан. В процессе сжигания топлива температура продуктов сгорания достигает 1060°С. Далее дымовые газы расширяются в газовоздушном тракте (ГТ) газовой турбины, лопатки которой охлаждаются с помощью отобранного из К воздуха. Газовая турбина располагается на одном валу с электрогенератором (ЭГ), с помощью которого механическая работа ГТ превращается в электрическую. На выхлопе газовой турбины размещен котел-утилизатор (КУ), пароводяной тракт которого состоит из пароперегревателя (ПП), испарителя (И), барабана (Б), экономайзера (Э) и газового подогревателя конденсата (ГПК). Охлажденные в КУ продукты сгорания направляются в установку с МЭА уходящих газов, после чего сбрасываются в атмосферу. В цилиндре высокого давления (ЦВД) перегревшийся пар совершает полезную работу, после чего поступает в цилиндр низкого давления (ЦНД). В ЦНД часть пара отбирается для подогрева питательной воды в деаэраторе (Д), а другая часть направляется в конденсатор (К-р). После фазового перехода полученный конденсат направляется в конденсатный насос (КН), который повышает давление конденсата до давления пароводяной среды в деаэраторе (Д). Температура на входе в деаэратор поддерживается постоянной за счет насоса рециркуляции (РН). В питательном насосе (ПН) питательная вода сжимается до давления, которое позволит рабочей среде преодолеть пароводяной тракт КУ.

Для сокращения эмиссии углекислого газа традиционно используется схема ПГУ с МЭА уходящих газов. В абсорбционной колонне происходит реакция абсорбции, в ходе которой углекислый газ поглощается моноэтаноламином. В регенерационной колонне с помощью ребойлера подводится тепло для протекания реакции десорбции, в ходе которой образуются насыщенный амин и диоксид углерода, которые направляются на захоронение с помощью многоступенчатого компрессора с промежуточным охлаждением.

Для снижения потерь в конденсаторе и повышения эффективности пароводяного контура в тринарной ПГУ используется развитая система регенерации (рис. 2). С помощью первого и второго подогревателей низкого давления (ПНД-1; ПНД-2) и подогревателя высокого давления (ПВД) повышается температура питательной воды, что позволяет повысить среднеинтегральную температуру подвода теплоты. Эффективность КУ при увеличении температуры питательной воды снижается из-за роста температуры дымовых газов. Теплоту уходящих газов можно полезно утилизировать в низкокипящем цикле, который представляет собой цикл Ренкина, работающий на фреоне R-236fa, с рекуперацией тепла.

ОЦР работает следующим образом: горячий поток передает теплоту в утилизаторе и направляется на установку МЭА дымовых газов. Теплота воспринимается рабочим телом цикла, который после нагрева в утилизаторе расширяется в углекислотной турбине (УТ), совершая работу, после чего передает остаточную энергию в рекуператоре и поступает в конденсатор, где, охлаждаясь до линии насыщения и переходя из паровой фазы в жидкую, передает теплоту холодному источнику цикла. Сконденсировавшаяся среда сжимается в углекислотном насосе (УН), нагревается в рекуператоре и поступает в утилизатор. Исходные данные для моделирования бинарного и тринарного цикла представлены в табл. 2.

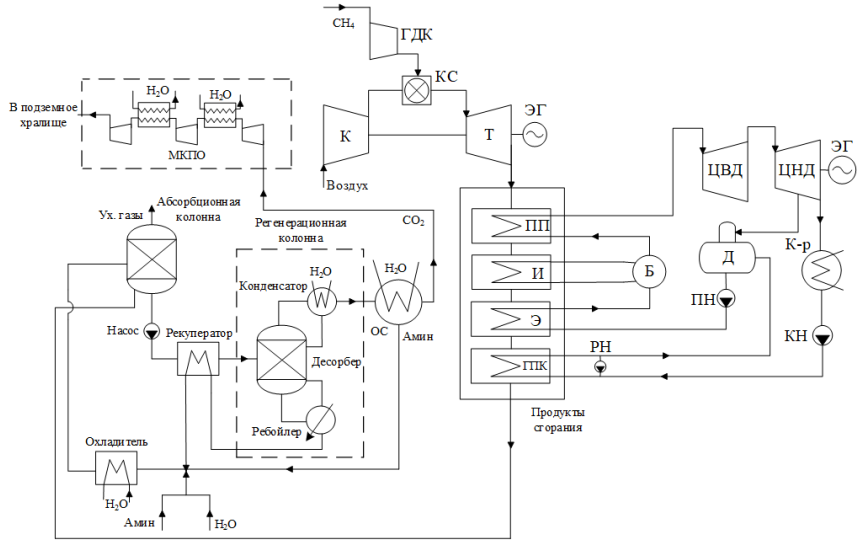


Рис. 1. Бинарная ПГУ с МЭА уходящих газов

Fig. 1. Binary CCGT with mono ethanolamine cleaning of exhaust gases

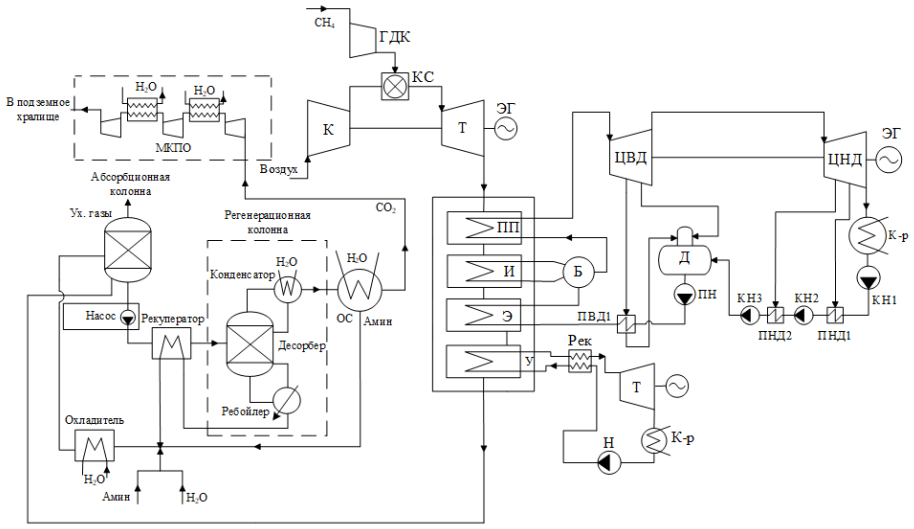


Рис. 2. Тринарная ПГУ с МЭА уходящих газов

Fig. 2. Trinary CCGT unit with monoethanolamine cleaning of exhaust gases

На рис. 3 и 4 представлены технологические схемы бинарных и тринарных энергетических циклов, работающих на водородном топливе. Водород производится с помощью установки ПКМ, риформер которой интегрирован в ГТ ПГУ перед входом в КУ.

Для производства водорода пар отбирается из ЦВД при давлении 2,2 МПа, после чего смешивается с метаном, который предварительно нагрелся до 450°С в высокотемпературном реакторе. Образованный синтез-газ нагревается до температуры 850°С с помощью теплоты, которая образуется при дожигании топлива в водородной печи риформера до температуры 875°С. Далее в высокотемпературном (ВТР) и низкотемпературном (НТР) реакторах повышается содержание H_2 в газовой смеси за счет каталитической реакции монооксида углерода с водяным паром. После

Таблица 2

Исходные данные для моделирования бинарных и тринарных ПГУ

Table 2

Initial data for modeling binary and trinary CCGT

Параметр	Размерность	Значение
Температура окружающей среды	°C	15
Давление окружающей среды	кПа	101,3
Давление продуктов сгорания на входе в ГТ	МПа	1.06
Температура продуктов сгорания на входе в ГТ	°C	1060
Недогрев в ПП	°C	20
Температура пара на выходе из КУ	°C	515
Недогрев на входе в экономайзер/деаэратор/конденсатор	°C	10
Давление в деаэраторе	МПа	0,12
Гидравлические потери в подогревателях	%	5
Внутренний КПД компрессора, питательного, конденсатного, циркуляционного насосов	%	85
Недогрев на горячем конце ПП	°C	20
Степень сухости пара на выходе из турбины	%	90
Механический КПД	%	99
КПД электрогенераторов и электродвигателей	%	99
Внутренний относительный КПД турбины	%	85
Тепловые потери в теплообменных аппаратах	%	1
Степень сухости на выходе из паровой турбины	%	90
Недогрев в подогревателе высокого/низкого давления	°C	1,5/5
Внутренний относительный КПД углекислотного насоса/компрессора	%	85
Рабочая среда ОЦР	–	R236fa
Температура в конденсаторе ОЦР	°C	30

чего, охладившись в теплообменнике-охладителе (ТО), из синтез-газа удаляется влага в охладителе-сепараторе (ОС), отвод теплоты от которого осуществляется за счет прокачки циркуляционной воды. В установку абсорбции (А) направляется синтез-газ, где производится удаление из потока углекислого газа, который направляется на захоронения с помощью многоступенчатого компрессора с промежуточным охлаждением. В итоге на выходе из установки ПКМ получается водород с высокой степенью очистки, который направляется в камеру сгорания и в печь рифомрера. Утилизация теплоты из ВТР, НТР и ТО происходит с помощью питательной воды, отобранной после ПН. Пар после ВТР нагревается до температуры 515°С, после чего направляется в ЦВД. Исходные данные для моделирования бинарного и тринарного циклов с интегрированными установками очистки углекислого газа представлены в табл. 3.

Методика термодинамического анализа

Моделирование технологических схем бинарных и тринарных ПГУ с минимальными выбросами углекислого газа производилось с помощью программы Aspen Plus[1], которая нашла широкое

[1] Aspen Plus | Leading Process Simulation Software | AspenTech. Режим доступа: https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus (дата обращения: 19.07.2021).

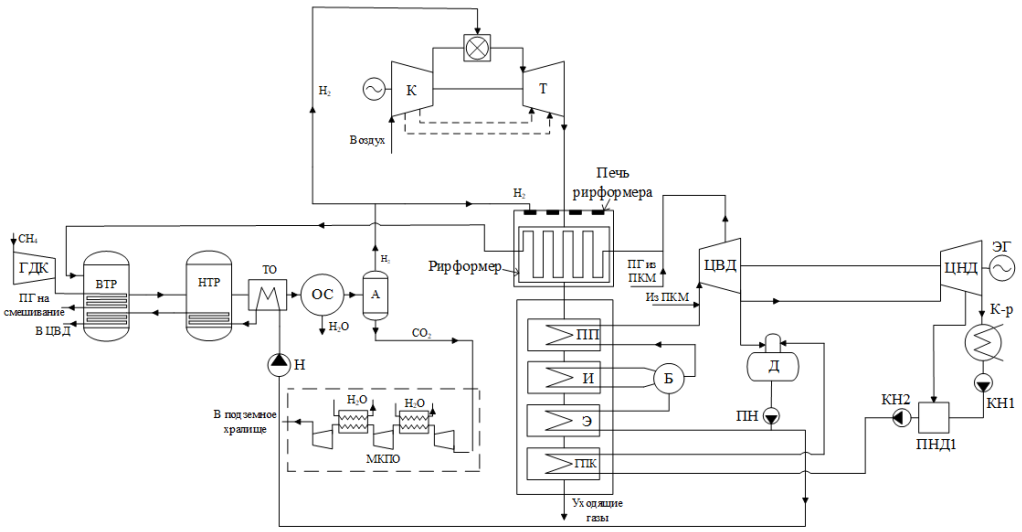


Рис. 3. Бинарная ПГУ с интегрированной установкой ПКМ
Fig. 3. Binary CCGT with integrated steam methane reforming unit

применение при проведении расчетов процессов в энергетических и нефтехимических комплексах и часто используется при моделировании установок улавливания диоксида углерода. Теплофизические свойства веществ определялись использованием базы данных NIST REFPROP [25].

При моделировании тринарных и бинарных ПГУ с улавливанием углекислого газа принимались следующие допущения:

- отсутствие химического недожога при процессе горения топлива;
- отсутствие потерь давления в трубопроводах;
- при гонении топлива не образуются оксиды азота.

Процесс горения в камере сгорания и печи риформера протекает исходя из уравнения (1) для метана и уравнения (2) для водорода:

$$CH_4 + 2 \cdot O_2 = 2 \cdot H_2O + CO_2, \quad (1)$$

$$2 \cdot H_2 + O_2 = 2 \cdot H_2O. \quad (2)$$

В риформере установки ПКМ протекает реакция окисления метана водяным паром, а в высокотемпературном реакторе – реакция водяного сдвига, которые рассчитываются исходя из формул (3) и (4) соответственно [28]:

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2;\ \Delta H_0 = 206,2 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, \quad (3)$$

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2;\ \Delta H_0 = -41,2 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}. \quad (4)$$

МЭА от диоксида углерода в регенерационной колонне производится путем абсорбции [27], в которой можно выделить три основных этапа. На первом этапе происходит образование карбамата моноэтаноламмония:

$$2NH_2CH_2CH_2OH + CO_2 \leftrightarrow CH_2CH_2OHNHCOOCH_2CH_2OHNH_3. \quad (5)$$

Таблица 3

Исходные данные для моделирования системы улавливания углекислого газа

Table 3

Initial data for modeling the carbon dioxide capture system

Параметр	Значение	
Способ улавливания углекислого газа	МЭА	ПКМ
Топливо, подаваемое в КС	CH_4	H_2
Температура синтез-газа на выходе из риформера, ˚С	–	850
Давление синтез-газа на выходе из риформера, МПа	–	2,2
Давление потока уходящих газов, атм	1	
Доля амина, направленного в ребойлер	0,7	–
Давление насоса насыщенного амина на выходе, бар	1,1	–
Доля рефлюкса в конденсаторе	0,5	–
Потеря давления в ступени регенерационной колонны	0,7	–

В ходе гидролиза карбамата образуются бикарбонат и молекула свободного моноэтаноламина:

$$\begin{gathered} CH_2CH_2OHNHCOOCH_2CH_2OHNH_3 + H_2O \leftrightarrow \\ \leftrightarrow CH_2CH_2OHNH_2 + CH_2CH_2OHNH_3HCO_3. \end{gathered} \quad (6)$$

Образованный моноэтаноламин снова вступает в реакцию:

$$CO_2 + CH_2CH_2OHNH_2 + H_2O \leftrightarrow CH_2CH_2OHNH_3HCO_3. \quad (7)$$

Рассчитывается мощность *i*-го контура ПГУ:

$$N_i = N_i^{Э} - N_i^{СН}, \quad (8)$$

где $N_i^{Э}$ – мощность турбоустановки *i*-го контура, МВт; $N_i^{СН}$ – мощность СН для *i*-го контура, МВт.

Рассчитываются мощности бинарной и тринарной ПГУ:

$$N_e^{ПГУ} = N_{ГТУ} + N_{ПТУ} + N_{ОЦР}, \quad (9)$$

где $N_{ГТУ}$ – мощность газотурбинной установки (ГТУ), МВт; $N_{ПТУ}$ – мощность ПТУ, МВт; $N_{ОЦР}$ – мощность ОЦР, МВт.

Рассчитывается мощность СН ПГУ:

$$N_{СН}^{ПГУ} = N_{СН}^{ГТУ} + N_{СН}^{ПТУ} + N_{СН}^{ОЦР}, \quad (10)$$

где $N_{СН}^{ГТУ}$ – мощность СН ГТУ, МВт; $N_{СН}^{ПТУ}$ – мощность СН ПТУ, МВт; $N_{СН}^{ОЦР}$ – мощность СН ОЦР, МВт.

Рассчитываются потери электроэнергии на СН:

$$N_{СН}^{УЛ} = N_{ПКМ}^{СН} + N_{МЭА}^{СН} + N_{КЗ}, \quad (11)$$

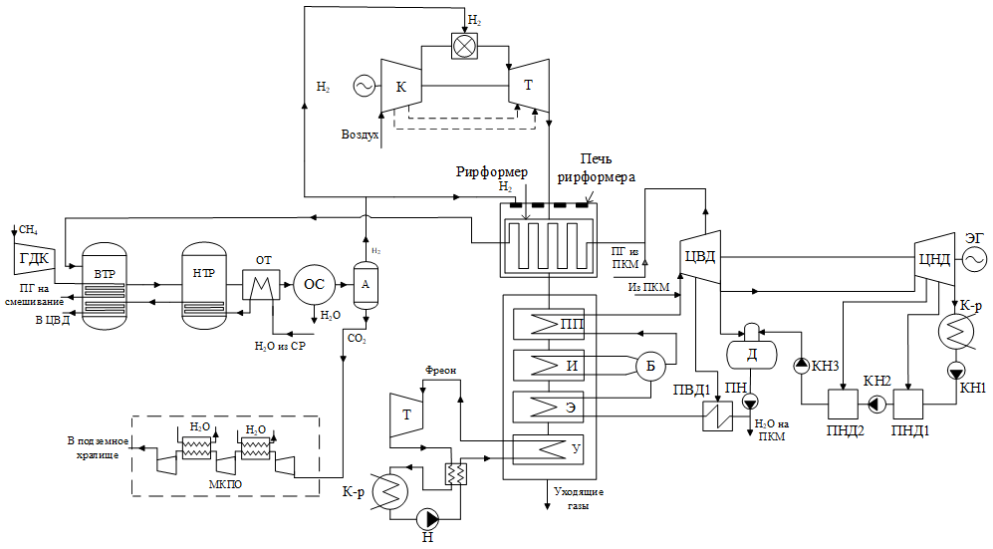


Рис. 4. Тринарная ПГУ с интегрированной установкой ПКМ
Fig. 4. Trinary CCGT with integrated steam methane reforming unit

где $N_{\text{ПКМ}}^{\text{СН}}$ – затраты энергии на СН установки ПКМ, МВт; $N_{\text{МЭА}}^{\text{СН}}$ – затраты энергии на СН установки МЭА уходящих газов, МВт; $N_{\text{КЗ}}$ – затраты энергии на захоронение CO_2.

Рассчитывается КПД нетто для бинарных и тринарных циклов с системами улавливания углекислого газа:

$$\eta_{\text{нетто}}^{\text{ПГУ}} = \frac{N_e^{\text{ПГУ}} - N_{\text{СН}}^{\text{ПГУ}} - N_{\text{СН}}^{\text{УЛ}}}{B \cdot Q_{\text{н}\text{CH}_4}^{\text{р}}}, \quad (12)$$

где B – массовый расход метана; $Q_{\text{н}\text{CH}_4}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания метана.

Результаты

Для сравнения термодинамических характеристик бинарных и тринарных ПГУ с технологиями улавливания углекислого газа post- и pre-combustion capture анализ проводился в удельных величинах относительно суммарной подведенной тепловой мощности. Стоит отметить, что для ПГУ с технологией улавливания углекислого газа post-combustion capture подвод теплоты осуществляется в камере сгорания, для ПГУ с pre-combustion capture – в камере сгорания и печи риформера.

По результатам термодинамического анализа бинарной ПГУ с МЭА уходящих газов выявлено, что газотурбинная установка с учетом электромеханических потерь вырабатывает 139,9 МВт электрической энергии, что составляет 32,34% от всей подведенной к ПГУ тепловой мощности. После чего тепловая мощность уходящих газов на выхлопе из газовой турбины, равная 283,4 МВт, утилизируется в пароводяном контуре. Однако из-за тепловых потерь в конденсаторе, равных 139,7 МВт, и тепловых потерь с уходящими газами, равных 58,7 МВт, в паровой турбине вырабатывается только 81 МВт электрической энергии. При учете СН ПТУ, которые затрачиваются на конденсационные и питательные насосы, данное значение уменьшается до 79 МВт. В итоге с учетом всех ранее указанных энергетических потерь КПД пароводяного контура ПГУ составляет 36,01%.

Стоит отметить, что потери с уходящими газами в котле-утилизаторе связанны с высокой температурой уходящих газов, равной 145°С. Более глубокое охлаждение уходящих газов на

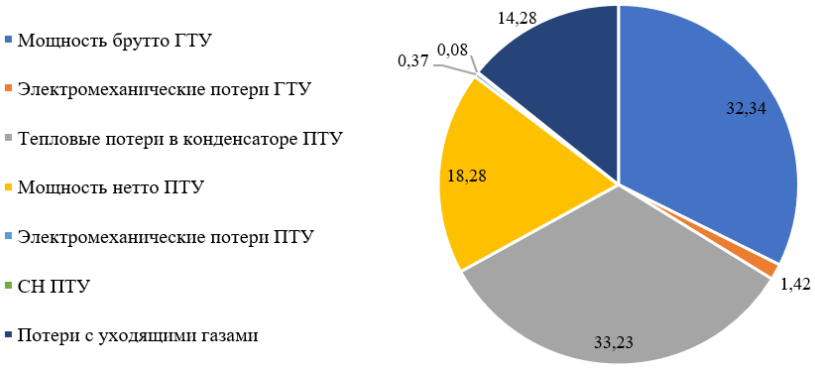


Рис. 5. Энергетическая диаграмма бинарной ПГУ
Fig. 5. Energy diagram of a binary CCGT

бинарных ПГУ попросту невозможно из-за подогрева конденсата в системе регенерации низкого давления и деаэраторе до 106°С. На рис. 5 представлена энергетическая диаграмма бинарной ПГУ.

Суммарная выработка электрической энергии в газовоздушном и пароводяном контурах составляет 218,5 МВт, что составляет 50,52% от подведенной в цикл теплоты. При этом для удаления углекислого газа требуется затратить 40 МВт тепловой энергии, а для захоронения – 9,6 МВт. В итоге энергоэффективность ПГУ с МЭА уходящих газов составляет 39,10%. На рис. 6 представлена диаграмма СН на удаление и захоронение углекислого газа бинарной ПГУ с МЭА дымовых газов.

Результаты моделирования тринарной ПГУ с МЭА уходящих газов помогли установить, что наличие развитой системы регенерации позволяет уменьшить потери в конденсаторе ПТУ на 30,6 МВт, то есть на 7,07% от всей подведенной в ПГУ тепловой мощности. В итоге это приводит к тому, что КПД пароводяного контура ПГУ увеличивается на 3,09% и составляет 39,10%. Однако из-за наличия развитой системы регенерации потери с уходящими газами на выходе из котла-утилизатора повышаются на 38,6 МВт относительно бинарной ПГУ с МЭА дымовых газов. Данный эффект связан с повышением температуры питательной воды на 34°С, из-за чего температура уходящих газов на выходе из котла-утилизатора повышается до 205°С.

Для утилизации 97,2 МВт низкопотенциальной теплоты в тринарных циклах используется ОЦР, в утилизационной турбине которого вырабатывается 15,5 МВт электрической энергии. При учете СН, которые затрачиваются на работу утилизационного насоса, данное значение уменьшается до 13,2 МВт. Стоит отметить, что температура рабочей среды на входе в утилизационную турбину равна 190°С, из-за чего в низкокипящем цикле наблюдаются большие потери в конденсаторе, равные 54,7 МВт.

В ходе термодинамического анализа было установлено, что из-за более глубокой утилизации располагаемой тринарной ПГУ тепловой энергии температура уходящих газов понижается до 80°С, из-за чего снижаются потери с уходящими газами на выходе из газовоздушного контура энергоблока на 31,9 МВт относительно бинарной ПГУ. На рис. 7 представлена энергетическая диаграмма тринарной ПГУ.

Мощность брутто цикла составляет 224,4 МВт. При этом расход продуктов сгорания равен 508,7 кг/с, что идентично расходу продуктов сгорания в бинарной ПГУ, из-за чего энергетические затраты на удаление и захоронение углекислого газа остаются неизменными. В итоге КПД нетто тринарной ПГУ равен 40,35%. На рис. 8 представлена диаграмма СН на удаление и захоронение углекислого газа тринарной ПГУ с МЭА уходящих газов.

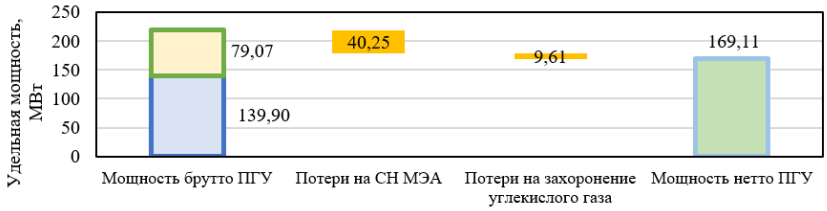


Рис. 6. Энергетическая диаграмма бинарной ПГУ с учетом затрат на МЭА дымовых газов
Fig. 6. Energy diagram of a binary CCGT taking into account the costs of monoethanolamine cleaning of flue gases

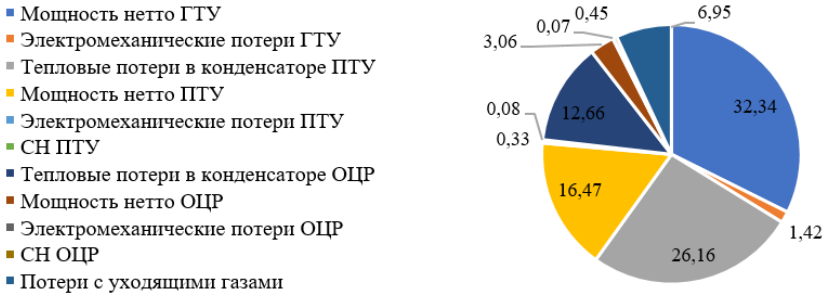


Рис. 7. Энергетическая диаграмма тринарной ПГУ
Fig. 7. Energy diagram of a trinary CCGT unit

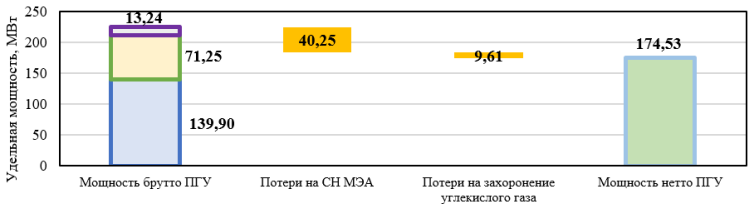


Рис. 8. Энергетическая диаграмма тринарной ПГУ с учетом затрат на МЭА дымовых газов
Fig. 8. Energy diagram of a trinary CCGT taking into account the costs of monoethanolamine cleaning of flue gases

С помощью интегрированной установки ПКМ в бинарном парогазовом цикле (рис. 9) производится водородное топливо. Для протекания эндотермической реакции риформинга продукты сгорания на выходе из газовой турбины нагреваются с 535°С до 875°С печью риформера, с помощью которой в цикл ПГУ подводится 160 МВт дополнительной тепловой энергии. Для повышения подводимой в цикл тепловой мощности в энергетический цикл ПГУ увеличивается и расход топлива на 3,19 кг/с относительно ПГУ с МЭА дымовых газов. В итоге в камеру сгорания подводится 66,97% от всего подводимого в цикл тепла, а в печь риформера – 34,12%.

Результаты моделирования позволили установить, что в установку ПКМ суммарно подводится 402,9 МВт тепловой энергии, из которой только 218,8 МВт направляется на нагрев синтез-газа до температуры 850°С. При этом в процессе парового риформинга теряется 27,1 МВт тепла, все остальное тепло, равное 191,7 МВт, полезно утилизируется в паротурбинном цикле, что приводит к росту расхода пара в паровой турбине в 1,92 раза (61,05 кг/с).

После первого отбора из паровой турбины отбирается 51,99 кг/с пара для протекания реакции паровой конверсии в установке риформинга. В конденсатор подводится 51,99 кг/с добавочной воды, которая после подогрева в системе регенерации до температуры 107°С направляется для

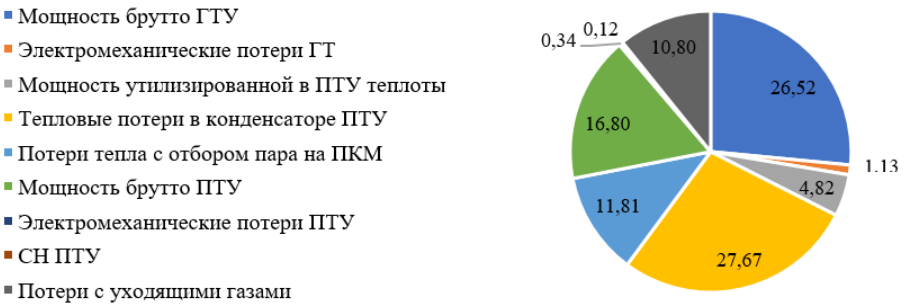


Рис. 9. Энергетическая диаграмма бинарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ
Fig. 9. Energy diagram of a binary CCGT with an integrated steam methane reforming unit

утилизации избыточной теплоты в установку ПКМ. Перечисленные выше факторы обуславливают прирост мощности в паровом цикле на 11,38 МВт относительно бинарной установки с МЭА уходящих газов, при этом для работы установки ПКМ требуется затратить 2,8 МВт электрической энергии на СН ПКМ и 14,3 МВт на захоронение углекислого газа. В итоге эффективность энергоблока относительно бинарного парогазового цикла с МЭА дымовых газов увеличивается на 1,16% и составляет 40,26%. Энергетическая диаграмма бинарной ПГУ с учетом затрат на ПКМ представлена на рис. 10.

Термодинамический анализ тринарной ПГУ с интегрированной установкой паровой конверсии (рис. 11) показал, что утилизация теплоты синтез-газа, равного 191 МВт, позволяет увеличить располагаемую мощность паровой турбины на 19,2 МВт относительно бинарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ. Данный прирост связан с тем, что из-за развитой системы регенерации потери в конденсаторе уменьшаются на 6,69 МВт, из-за чего эффективность тринарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ увеличивается на 0,16% относительно бинарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ.

Мощность нетто тринарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ равна 250,7 МВт. При этом расход продуктов сгорания равен 505,6 кг/с, что идентично расходу продуктов сгорания в бинарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ, из-за чего энергетические затраты на удаление и захоронение углекислого газа остаются неизменными. Стоит отметить, что потери на СН ПКМ и захоронение углекислого газа не изменяются относительно комбинированной бинарной ПГУ с ПКМ. В итоге эффективность энергоблока увеличивается на 1,27% и составляет 41,62% (рис. 12).

Сравнение результатов исследований четырех рассмотренных технологических схем GUE с минимальными выбросами вредных веществ в атмосферу позволяет прийти к заключению, что переход бинарной ПГУ с МЭА уходящих газов на водородное сжигание с производством топлива с помощью установки ПКМ позволяет повысить эффективность на 1,16%, а переход тринарной ПГУ – на 1,27%. Разница энергетической эффективности в 0,11% связана с тем, что подведенная в цикл тепловая энергия утилизируется в более энергетически эффективном пароводяном контуре с развитой системой регенерации, что позволяет уменьшить потери тепловой энергии в конденсаторе тринарного цикла на 6,69 МВт относительно бинарных ПГУ. В итоге за счет установки ПКМ в бинарной ПГУ дополнительно вырабатывается 16,2 МВт. В тринарной установке за счет снижения потерь в конденсаторе данное значение повышается на 0,6 МВт и равняется 16,8 МВт.

Результаты сравнения энергетической эффективности тринарных и бинарных ПГУ с интегрированными системами улавливания углекислого газа представлены на рис. 13. Наиболее эффективным циклом является тринарная ПГУ с КПД нетто, равным 41,62%. Данная эффективность достигается за счет снижения затрат на СН системы улавливания углекислого газа на 5,67 МВт

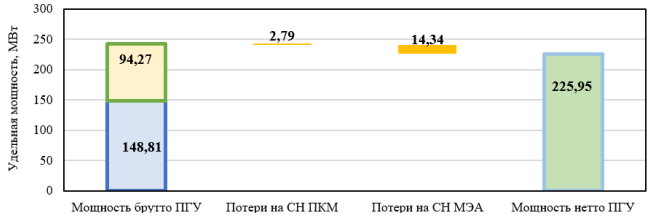


Рис. 10. Энергетическая диаграмма бинарной ПГУ с учетом затрат на ПКМ
Fig. 10. Energy diagram of a binary CCGT taking into account the costs of steam methane reforming

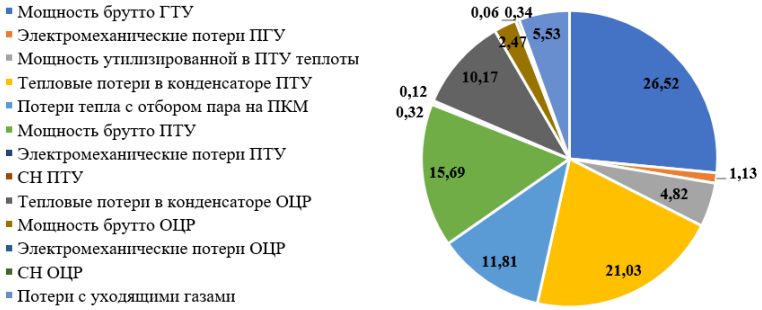


Рис. 11. Энергетическая диаграмма тринарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ
Fig. 11. Energy diagram of a trinary CCGT with an integrated steam methane reforming unit

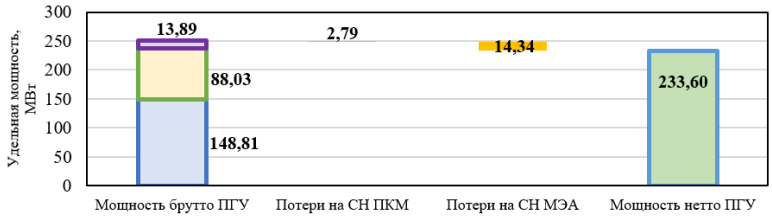


Рис. 12. Энергетическая диаграмма тринарной ПГУ с учетом затрат на ПКМ
Fig. 12. Energy diagram of a trinary CCGT taking into account the costs of steam methane reforming

относительно ПГУ с МЭА дымовых газов. Связано это с отсутствием дополнительных затрат на десорбцию моноэтаноламина с помощью ребойлера, на который затрачивается 40 МВт электрической энергии.

Выводы

В настоящей работе разработаны технологические схемы и математические модели следующих ПГУ с технологиями улавливания углекислого газа post- и pre-combustion capture:

1) бинарная ПГУ с МЭА уходящих газов;
2) тринарная ПГУ с МЭА уходящих газов;
3) бинарная ПГУ с интегрированной установкой ПКМ;
4) тринарная ПГУ с интегрированной установкой ПКМ.

По результатам математического моделирования технологических схем парогазовых энергоустановок с температурой и давлением на входе в газовую турбину, равными 1060°С и 1,09 МПа,

Рис. 13. Сравнение энергетической эффективности тринарных и бинарных ПГУ с интегрированными системами улавливания углекислого газа

Fig. 13. Comparison of energy efficiency of trinary and binary CCGTs with integrated carbon dioxide capture systems

составлены энергетические диаграммы, исходя из которых было установлено, что при переходе с бинарной ПГУ с МЭА уходящих газов на бинарную ПГУ с интегрированной установкой ПКМ КПД нетто увеличивается на 1,16%. Это обусловлено следующими причинами:

1. В процессе охлаждения синтез-газа в установке парового риформинга метана в охладителе-сепараторе теряется 27,1 МВт тепловой энергии, однако при МЭА уходящих газов требуется затратить 40 МВт электрической энергии на подогрев амина в ребойлере.

2. При переходе с бинарной ПГУ с МЭА уходящих газов на бинарную ПГУ с интегрированной установкой ПКМ энергетические потери на захоронение углекислого газа увеличиваются на 4,7 МВт, что связано с повышением выбросов углекислого газа на 33% в связи с ростом расхода топлива на 3,19 кг/с.

3. Для протекания реакции паровой конверсии из паровой турбины отбирается 52 кг/с, однако из-за того, что при утилизации 191,7 МВт тепловой энергии вырабатывается 61 кг/с пара, который направляется в ПТУ, мощность нетто ПТУ увеличивается на 16,2 МВт.

Сравнительный анализ энергетических и термодинамических характеристик показал, что переход с бинарной на тринарную ПГУ с МЭА уходящих газов приводит к росту КПД нетто на 1,25%. Это обусловлено следующими причинами:

- ростом суммарных потерь в конденсаторах ПТУ и ОЦР на 24,2 МВт;
- ростом суммарных СН ПТУ и ОЦР на 1,4 МВт;
- снижением потерь с уходящими газами на выходе из газовоздушного контура ПГУ на 31,7 МВт;
- ростом мощности нетто парогазовой станции на 5,4 МВт.

Результаты моделирования позволили установить, что переход бинарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ на тринарную ПГУ с интегрированной установкой ПКМ позволяет утилизировать 191,7 МВт тепловой энергии, отводимой от риформера, в более эффективном пароводяном контуре с развитой системой регенерации, эффективность которого выше на 0,16% по сравнению с пароводяным контуром без развитой системы регенерации. В итоге рост расхода пара в паровой турбине на 61 кг/с приводит к тому, что в бинарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ дополнительно вырабатывается 15,2 МВт, а в тринарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ – 16,8 МВт относительно ПГУ с МЭА уходящих газов. Прирост электрической мощности нетто в тринарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ на 1,6 МВт обуславливает повышение эффективности на 1,36% относительно бинарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ.

Таким образом, установлено, что наибольшая энергетическая эффективность наблюдается у тринарной ПГУ с интегрированной установкой ПКМ, КПД нетто которой равняется 41,62%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Ivanova S., Vesnina A., Fotina N., Prosekov A.** An Overview of Carbon Footprint of Coal Mining to Curtail Greenhouse Gas Emissions // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 22. Art. no. 15135. DOI: 10.3390/su142215135

[2] **Rashid M.I., Benhelal E., Rafiq S.** Reduction of greenhouse gas emissions from gas, oil, and coal power plants in Pakistan by carbon capture and storage (CCS): A review // Chemical Engineering & Technology. 2020. Vol. 43, No. 11. Pp. 2140–2148. DOI: 10.1002/ceat.201900297

[3] **Kindra V., Rogalev A., Lisin E., Osipov S., Zlyvko O.** Techno-economic analysis of the oxy-fuel combustion power cycles with near-zero emissions // Energies. 2021. Vol. 14, No. 17. Art. no. 5358. DOI: 10.3390/en14175358

[4] **Mohamed U., Zhao Y.-j., Yi Q., Shi L.-j., Wei G.-q., Nimmo W.** Evaluation of life cycle energy, economy and CO_2 emissions for biomass chemical looping gasification to power generation // Renewable Energy. 2021. Vol. 176. Pp. 366–387. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.067

[5] **Ritchie H., Rosado P., Roser M.** Breakdown of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions by sector // OurWorldinData.org. 2020. Режим доступа: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector (дата обращения: 10.01.2024).

[6] **Новак А.** ТЭК России сегодня и завтра: итоги и задачи // Энергетическая политика. 2024. Т. 1, № 192. С. 6–13. DOI: 10.46920/2409-5516_2024_1192_6

[7] **Inderjeet M.** Fuel transition from non-renewable to renewable for gas turbines in a changing Europe. Ph.D. Thesis, Technische Hochschule Ingolstadt, Ingolstadt, Germany, 2023.

[8] **Киндра В.О., Комаров И.И., Злывко О.В., Максимов И.А., Островский М.А.** Термодинамический анализ тринарных энергоустановок // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. 2024. № 1. С. 70–81. DOI: 10.31857/S0002331024010091

[9] **Ancona M.A., Bianchi M., Branchini L., de Pascale A., Melino F., Peretto A., Torricelli N.** Systematic comparison of ORC and s-CO_2 combined heat and power plants for energy harvesting in industrial gas turbines // Energies. 2021. Vol. 14, No. 12. Art. no. 3402. DOI: 10.3390/en14123402

[10] **Kindra V., Rogalev N., Osipov S., Zlyvko O., Naumov V.** Research and development of trinary power cycles // Inventions. 2022. Vol. 7, No. 3. Art. no. 56. DOI: 10.3390/inventions7030056

[11] **Sultan H., Muhammad H.A., Bhatti U.H., Min G.H., Baek I.H., Baik Y.-J., Nam S.C.** Reducing the efficiency penalty of carbon dioxide capture and compression process in a natural gas combined cycle power plant by process modification and liquefied natural gas cold energy integration // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 244. Art. no. 114495. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114495

[12] **Ibigbami O.A., Onilearo O.D., Akinyeye R.O.** Post-combustion capture and other Carbon Capture and Sequestration (CCS) technologies: A review // Environmental Quality Management. 2024. Vol. 34, No. 1. Art. no. e22180. DOI: 10.1002/tqem.22180

[13] **Song C., Liu Q., Deng S., Li H., Kitamura Y.** Cryogenic-based CO_2 capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 101. Pp. 265–278. DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.018

[14] **Rath G.K., Pandey G., Singh S., Molokitina N., Kumar A., Joshi S., Chauhan G.** Carbon dioxide separation technologies: Applicable to net zero // Energies. 2023. Vol. 16, No. 10. Art. no. 4100. DOI: 10.3390/en16104100

[15] **Raganati F., Ammendola P.** CO_2 post-combustion capture: A critical review of current technologies and future directions // Energy & Fuels. 2024. Vol. 38, No. 15. Pp. 13858–13905. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02513

[16] **Kibkalo A.A., Pandey G., Pletneva K.A., Molokitina N.S., Kumar A., Zhingel P., Grigoriev B.V.** Enhanced methane hydrate formation kinetics in frozen particles of biopolymer solutions: Applicable to methane storage // Energy & Fuels. 2023. Vol. 37, No. 18. Pp. 13928–13936. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c02344

[17] **Kindra V., Maksimov I., Oparin M., Zlyvko O., Rogalev A.** Hydrogen technologies: A critical review and feasibility study // Energies. 2023. Vol. 16, No. 14. Art. no. 5482. DOI: 10.3390/en16145482

[18] **Ma L.-C., Castro-Dominguez B., Kazantzis N.K., Ma Y.H.** Integration of membrane technology into hydrogen production plants with CO_2 capture: An economic performance assessment study // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2015. Vol. 42. Pp. 424–438. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.08.019

[19] **Fernandez J.R., Abanades J.C., Grasa G.** Modeling of sorption enhanced steam methane reforming – Part II: Simulation within a novel Ca/Cu chemical loop process for hydrogen production // Chemical Engineering Science. 2012. Vol. 84. Pp. 12–20. DOI: 10.1016/j.ces.2012.07.050

[20] **Komarov I., Osipov S., Zlyvko O., Vegera A., Naumov V.** Combined cycle gas turbine for combined heat and power production with energy storage by steam methane reforming // Journal of Energy System. 2021. Vol. 5, No. 3. Pp. 231–243. DOI: 10.30521/jes.936064

[21] **Pashchenko D.** Performance evaluation of a combined power generation system integrated with thermochemical exhaust heat recuperation based on steam methane reforming // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, No. 15. Pp. 5823–5835. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.186

[22] **Mullen D., Herraiz L., Lucquiaud M.** Advanced thermodynamic integration in combined fuel and power (CFP) plants producing low carbon hydrogen & power with CCUS // Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference. 2021. Pp. 15–18.

[23] **Lozza G., Chiesa P.** Natural gas decarbonization to reduce CO2 emission from combined cycles – Part I: Partial oxidation // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2000. Vol. 124, No. 1. Pp. 82–88. DOI: 10.1115/1.1395581

[24] **Vorokhta M., Kusdhany M.I.M., Vöröš D., Nishihara M., Sasaki K., Lyth S.M.** Microporous carbon foams: The effect of nitrogen-doping on CO_2 capture and separation via pressure swing adsorption // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 471. Art. no. 144524. DOI: 10.1016/j.cej.2023.144524

[25] **Lemmon E.W., Bell I.H., Huber M.L., McLinden M.O.** NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018. DOI: 10.18434/T4/1502528

[26] **Quirino P.P.S., Amaral A., Pontes K.V., Rossi F., Manenti F.** Impact of kinetic models in the prediction accuracy of an industrial steam methane reforming unit // Computers & Chemical Engineering. 2021. Vol. 152. Art. no. 107379. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2021.107379

[27] **Stray J.D.** Control of Corrosion and Fouling in Amine Sweetening Systems // NACE Canada Region Western Conference Calgary. 1990. Pp. 20–22.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РОГАЛЕВ Андрей Николаевич – *заведующий кафедрой Инновационных технологий наукоемких отраслей, Московский энергетический университет (НИУ МЭИ), д-р техн. наук.*
E-mail: RogalevAN@mpei.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7256-0144

КИНДРА Владимир Олегович – *доцент кафедры Инновационных технологий наукоемких отраслей, Московский энергетический университет (НИУ МЭИ), без степени.*
E-mail: kindra.vladimir@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8406-7901

КОМАРОВ Иван Игоревич – *ведущий научный сотрудник, Московский энергетический университет (НИУ МЭИ), без степени.*
E-mail: KomarovII@mpei.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3853-8220

ЗЛЫВКО Ольга Владимировна – *доцент кафедры Инновационных технологий наукоемких отраслей, Московский энергетический университет (НИУ МЭИ), без степени.*
E-mail: ZlyvkoOV@mpei.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0554-4026

КОВАЛЕВ Дмитрий Сергеевич – *ассистент, Московский энергетический университет (НИУ МЭИ), без степени.*
E-mail: kov-d-s@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0660-6631

REFERENCES

[1] **S. Ivanova, A. Vesnina, N. Fotina, A. Prosekov,** An Overview of Carbon Footprint of Coal Mining to Curtail Greenhouse Gas Emissions, Sustainability, 14 (22) (2022) 15135. DOI: 10.3390/su142215135

[2] **M.I. Rashid, E. Benhelal, S. Rafiq,** Reduction of greenhouse gas emissions from gas, oil, and coal power plants in Pakistan by carbon capture and storage (CCS): A review, Chemical Engineering & Technology, 43 (11) (2020) 2140–2148. DOI: 10.1002/ceat.201900297

[3] **V. Kindra, A. Rogalev, E. Lisin, S. Osipov, O. Zlyvko,** Techno-economic analysis of the oxy-fuel combustion power cycles with near-zero emissions, Energies, 14 (17) (2021) 5358. DOI: 10.3390/en14175358

[4] **U. Mohamed, Y.-j. Zhao, Q. Yi, L.-j. Shi, G.-q. Wei, W. Nimmo,** Evaluation of life cycle energy, economy and CO_2 emissions for biomass chemical looping gasification to power generation, Renewable Energy, 176 (2021) 366–387. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.067

[5] **H. Ritchie, P. Rosado, M. Roser,** Breakdown of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions by sector, https://ourworldindata.org/emissions-by-sector. Accessed January 10, 2024.

[6] **A. Novak,** Fuel and energy Complex of Russia today and tomorrow: results and tasks, Energy Policy, 1 (192) (2024) 6–13. DOI: 10.46920/2409-5516_2024_1192_6

[7] **M. Inderjeet,** Fuel transition from non-renewable to renewable for gas turbines in a changing Europe, Ph.D. Thesis, Technische Hochschule Ingolstadt, Ingolstadt, Germany, 2023.

[8] **V.O. Kindra, I.I. Komarov, O.V. Zlyvko, I.A. Maksimov, M.A. Ostrovsky,** Thermodynamic analysis of a trinary power plant, Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Ènergetika, 1 (2024) 70–81. DOI: 10.31857/S0002331024010091

[9] **M.A. Ancona, M. Bianchi, L. Branchini, A. de Pascale, F. Melino, A. Peretto, N. Torricelli,** Systematic comparison of ORC and s-CO2 combined heat and power plants for energy harvesting in industrial gas turbines, Energies, 14 (12) (2021) 3402. DOI: 10.3390/en14123402

[10] **V. Kindra, N. Rogalev, S. Osipov, O. Zlyvko, V. Naumov,** Research and development of trinary power cycles, Inventions, 7 (3) (2022) 56. DOI: 10.3390/inventions7030056

[11] **H. Sultan, H.A. Muhammad, U.H. Bhatti, G.H. Min, I.H. Baek, Y.-J. Baik, S.C. Nam,** Reducing the efficiency penalty of carbon dioxide capture and compression process in a natural gas combined cycle power plant by process modification and liquefied natural gas cold energy integration, Energy Conversion and Management, 244 (2021) 114495. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114495

[12] **O.A. Ibigbami, O.D. Onilearo, R.O. Akinyeye,** Post-combustion capture and other Carbon Capture and Sequestration (CCS) technologies: A review, Environmental Quality Management, 34 (1) (2024) e22180. DOI: 10.1002/tqem.22180

[13] **C. Song, Q. Liu, S. Deng, H. Li, Y. Kitamura,** Cryogenic-based CO_2 capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101 (2019) 265–278. DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.018

[14] **G.K. Rath, G. Pandey, S. Singh, N. Molokitina, A. Kumar, S. Joshi, G. Chauhan,** Carbon dioxide separation technologies: Applicable to net zero, Energies, 16 (10) (2023) 4100. DOI: 10.3390/en16104100

[15] **F. Raganati, P. Ammendola,** CO_2 post-combustion capture: A critical review of current technologies and future directions, Energy & Fuels, 38 (15) (2024) 13858–13905. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02513

[16] **A.A. Kibkalo, G. Pandey, K.A. Pletneva, N.S. Molokitina, A. Kumar, P. Zhingel, B.V. Grigoriev,** Enhanced methane hydrate formation kinetics in frozen particles of biopolymer solutions: Applicable to methane storage, Energy & Fuels, 37 (18) (2023) 13928–13936. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c02344

[17] **V. Kindra, I. Maksimov, M. Oparin, O. Zlyvko, A. Rogalev,** Hydrogen technologies: A critical review and feasibility study, Energies, 16 (14) (2023) 5482. DOI: 10.3390/en16145482

[18] **L.-C. Ma, B. Castro-Dominguez, N.K. Kazantzis, Y.H. Ma,** Integration of membrane technology into hydrogen production plants with CO_2 capture: An economic performance assessment study, International Journal of Greenhouse Gas Control, 42 (2015) 424–438. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.08.019

[19] **J.R. Fernandez, J.C. Abanades, G. Grasa,** Modeling of sorption enhanced steam methane reforming – Part II: Simulation within a novel Ca/Cu chemical loop process for hydrogen production, Chemical Engineering Science, 84 (2012) 12–20. DOI: 10.1016/j.ces.2012.07.050

[20] **I. Komarov, S. Osipov, O. Zlyvko, A. Vegera, V. Naumov,** Combined cycle gas turbine for combined heat and power production with energy storage by steam methane reforming, Journal of Energy System, 5 (3) (2021) 231–243. DOI: 10.30521/jes.936064

[21] **D. Pashchenko,** Performance evaluation of a combined power generation system integrated with thermochemical exhaust heat recuperation based on steam methane reforming, International Journal of Hydrogen Energy, 48 (15) (2023) 5823–5835. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.186

[22] **D. Mullen, L. Herraiz, M. Lucquiaud,** Advanced thermodynamic integration in combined fuel and power (CFP) plants producing low carbon hydrogen & power with CCUS, Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference, (2021) 15–18.

[23] **G. Lozza, P. Chiesa,** Natural gas decarbonization to reduce CO_2 emission from combined cycles – Part I: Partial oxidation, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 124 (1) (2000) 82–88. DOI: 10.1115/1.1395581

[24] **M. Vorokhta, M.I.M. Kusdhany, D. Vöröš, M. Nishihara, K. Sasaki, S.M. Lyth,** Microporous carbon foams: The effect of nitrogen-doping on CO_2 capture and separation via pressure swing adsorption, Chemical Engineering Journal, 471 (2023) 144524. DOI: 10.1016/j.cej.2023.144524

[25] **E.W. Lemmon, I.H. Bell, M.L. Huber, M.O. McLinden,** NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018. DOI: 10.18434/T4/1502528

[26] **P.P.S. Quirino, A. Amaral, K.V. Pontes, F. Rossi, F. Manenti,** Impact of kinetic models in the prediction accuracy of an industrial steam methane reforming unit, Computers & Chemical Engineering, 152 (2021) 107379. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2021.107379

[27] **J.D. Stray,** Control of Corrosion and Fouling in Amine Sweetening Systems, NACE Canada Region Western Conference Calgary, (1990) 20–22.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Andrey N. ROGALEV – *National Research University "Moscow Power Engineering institute".*
E-mail: RogalevAN@mpei.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7256-0144

Vladimir O. KINDRA – *National Research University "Moscow Power Engineering institute".*
E-mail: kindra.vladimir@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8406-7901

Ivan I. KOMAROV – *National Research University "Moscow Power Engineering institute".*
E-mail: KomarovII@mpei.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3853-8220

Olga V. ZLYVKO – *National Research University "Moscow Power Engineering institute".*
E-mail: ZlyvkoOV@mpei.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0554-4026

Dmitriy S. KOVALEV – *National Research University "Moscow Power Engineering institute".*
E-mail: kov-d-s@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0660-6631

Поступила: 16.10.2024; Одобрена: 15.12.2024; Принята: 21.02.2025.
Submitted: 16.10.2024; Approved: 15.12.2024; Accepted: 21.02.2025.

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 79–87.
Global Energy, 2025, 31 (1); 79–87.

Научная статья
УДК 621.311.62
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31105

А.В. Быстров ✉ , *С.Г. Зверев*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ stalex81@yandex.ru

ОБРАТНОХОДОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА КЛЮЧЕ С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ, СТОКОМ – ЭМИТТЕРНЫЙ ИСТОКОВЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ

Аннотация. В настоящей статье представлен базовый обратноходовой преобразователь (*Flyback*) с инвертированной полярностью напряжения на выходе. Рассмотрены важные вопросы, возникающие при проектировании подобных устройств, такие как эффекты паразитных элементов, защита от неисправностей и включение силового ключа по схеме с общим коллектором, стоком (эмиттерный, истоковый повторитель). Исследовано влияние транзисторного ключа на тепловые режимы печатных узлов электронных устройств. Показано, что, если не учитывать тепловые процессы в печатных платах на этапе разработки, это может привести к снижению надежности электронных устройств. Моделирование и анализ выполнены в среде *Matlab Simulink*. Основной областью приложений рассматриваемого в работе инвертирующего обратноходового преобразователя является его работа в сетях 0,4 кВ в качестве источника вторичного питания.

Ключевые слова: импульсный преобразователь, обратноходовой преобразователь, общим коллектором, стоком, эмиттерный истоковый повторитель, печатные платы, тепловые процессы.

Для цитирования:

Быстров А.В., Зверев С.Г. Обратноходовой преобразователь на ключе с общим коллектором, стоком – эмиттерный истоковый повторитель // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 79–87. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31105

© Быстров А.В., Зверев С.Г., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31105

A.V. Bystrov ✉ , *S.G. Zverev*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ stalex81@yandex.ru

FLYBACK CONVERTER WITH A KEY ACTING AS A COMMON COLLECTOR, DRAIN – EMITTER, SOURCE FOLLOWER

Abstract. This paper presents a basic flyback converter with inverted polarity of the output voltage. Important issues arising in the design of such devices are considered, such as the effects of parasitic elements, protection against faults and inclusion of a power switch according to the scheme with a common collector, drain (emitter, source follower). The effect of a transistor switch on thermal conditions of printed circuit boards of electronic devices is investigated. It is shown that if thermal processes in printed circuit boards are not considered at the development stage, this can lead to a decrease in the reliability of electronic devices. Modeling and analysis are performed in the Matlab Simulink environment. The main area of application of the inverting flyback converter considered in the paper is its operation in 0.4 kV networks as a secondary power source.

Keywords: pulse converter, flyback converter, common collector, drain, emitter source follower, printed circuit boards, thermal processes.

Citation:

Bystrov A.V., Zverev S.G., Flyback converter with a key acting as a common collector, drain-emitter, source follower, Global Energy, 31 (01) (2025) 79–87, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31105

Введение

Растущий рынок потребительской электроники гарантирует постоянный промышленный интерес к потребительским источникам вторичного питания (ИВП) для адаптеров, зарядок ноутбуков, мобильных телефонов и светодиодных светильников. Следовательно, универсальные адаптеры, совместимые с несколькими устройствами разных выходных напряжений, обещают стать новым стандартом. Топология *Flyback* является популярным выбором из-за малого количества деталей и становится все более привлекательным вариантом для адаптеров средней мощности 50–100 Вт [1, 2].

Разработка и исследование новых топологий ИВП и их преимуществ перед существующими являются актуальными задачами, поскольку их решение напрямую связано, прежде всего, с повышением эффективности и надежности ИВП и снижением производственных затрат. Существует ряд известных работ, в которых повышение эффективности осуществляется посредством новой стратегии управления ключом от первичной части преобразователя [1, 3] и другими стратегиями оптимизации работы преобразователя [5, 6], основанными на функционировании ключа в квазирезонансном режиме [2, 4]. Однако в этих работах рассматривается ключ с общим эмиттером, истоком.

В этой статье представлена новая стратегия устройства на базе *Flyback*. В отличие от стандартного подхода, такая концепция предлагает изменить схему включения ключевого элемента. Это увеличивает время наработки устройства на отказ – более простое включение, выключение устройства и его плавный пуск, а также имеет ряд преимуществ перед теми ИВП, которые в настоящее время выпускаются промышленностью.

© Bystrov A.V., Zverev S.G., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Цель данной статьи – исследовать осуществимость предложенной концепции посредством математической модели ИВП в среде *Matlab Simulink*, обосновать ее преимущества перед традиционной стратегией построения ИВП, установить воздействие быстро изменяющейся нагрузки на величину выходного напряжения.

Методы и материалы

Традиционно в преобразователях ключи работают по схеме с общим эмиттером (ОЭ), или общим истоком (ОИ), но при превышении допустимой температуры паразитные сопротивления переводят его в приоткрытое состояние. Новая концепция предлагает заменить ключ по схеме с ОЭ (ОИ) на ключ по схеме с общим коллектором (ОК), или общим стоком (ОС), при этом дополнительно ввести индуктивную связь между формирователем импульсов управления и затвором ключа, а контроллер управления перенести на вторичную часть преобразователя. Это обеспечит прямой доступ к выходному напряжению, допуская более простое, быстрое и точное его измерение без необходимости какой-либо дополнительной оптической обратной связи, а также не позволит ключу находиться в приоткрытом состоянии. Для доказательства осуществимости изложенной концепции были разработаны и исследованы имитационные модели в среде *Matlab Simulink*. Было обнаружено, что предложенные концепции построения ИВП улучшают свойства разработанного устройства. Эффективность ИВП при полной нагрузке была измерена на уровне 90,77%, что делает предлагаемую концепцию хорошо подготовленной для конкуренции с другими современными решениями ИВП [6, 7]. Поэтому следует ожидать, что универсальные источники питания будут совместимы со многими устройствами и различными выходными напряжениями.

Характеристика термостойкости печатной платы (ПП) – температура стеклования *Tg*, при которой вещество, из которого она сделана, переходит из твердого состояния в мягкое. Обычно для *PCB* из СТЭФ *Tg* = 130 °С [8, 9]. Другими словами, если ПП нагревается выше 130 °С, она быстро ухудшает свои электрофизические свойства: вы не только получите нестабильную механическую структуру, это приведет к деструкции ПП и сокращению срока службы электронного устройства в целом [8, 10]. Для оценки тепловыделения могут быть использованы принципы, обсуждаемые в [11, 12].

Даже в правильно спроектированных ПП с учетом их теплопроводности, тепловыделения и охлаждения могут быть зоны перегрева, способные привести к прогару ПП и даже их возгоранию. Чаще всего зоны перегрева находятся в области большой разности потенциалов и около выводов мощных транзисторов, впаянных в ПП (рис. 1) [12, 13].

Зоны *R*1 и *R*2 – паразитные резисторы, и их величины определяются объемным удельным сопротивлением СТЭФ. Зона *R*1 – сопротивление СТЭФ между коллектором и эмиттером. Зона *R*2 – сопротивление СТЭФ между коллектором и затвором. Величины *R*1 и *R*2 определяются в Ом соотношением [14, 15]:

$$R = \frac{\rho_v l}{S}, \tag{1}$$

где ρ_v – удельное объемное сопротивление СТЭФ, Ом*мм; l – длина участка зоны перегрева, мм; S – площадь сечения зоны перегрева, мм^2.

При толщине СТЭФ 1,5 мм и ширине металлизации отверстий посадочного места для транзистора 4 мм S = 6 мм^2, а l = 1,5 мм. При нормальном тепловом режиме печатной платы [14] $\rho_v = 10^8$ Ом*мм, тогда из соотношения (1) $R1 = R2 = 25$ МОм.

В случае нарушения отвода тепла в электронном устройстве, неточного теплового расчета ПП и неправильной компоновки на ней электронных компонентов формируются зоны перегрева (рис. 1). Если сравнить зоны *R*1 и *R*2, то теплоотвод от зоны *R*1 значительно эффективнее,

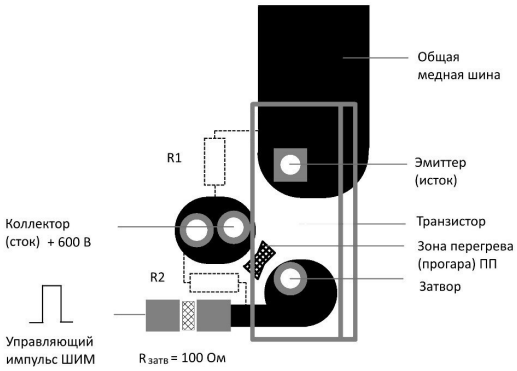


Рис. 1. Фрагмент ПП с впаянным мощным транзистором
Fig. 1. Fragment of the printed circuit board with a soldered-in powerful transistor

потому что имеется хороший тепловой контакт с общей медной шиной, через которую и отводится тепло. В зоне $R2$ тепло отводится через контакт этой зоны с окружающей средой. Такой тепловой контакт имеет неэффективный отвод тепла. Ввод тепла в данную зону осуществляется через коллекторный вывод транзистора. При перегреве транзистора в зоне $R2$ формируется область с температурой, значительно превышающей температуру стеклования Tg. В результате перегрева зоны $R2$ ρ_v падает до 10^5 Ом*мм [14]. Согласно выражению (1), сопротивление зоны $R2$ = = 25 кОм, что существенно влияет на режим работы транзистора при управляющем сигнале ШИМ затвора $U_g = 0$ В. В этом случае в схеме замещения (рис. 2а) сопротивления $R2$ и $R_{затв}$ работают как делитель напряжения +600 В.

Таким образом, на резисторе $R_{затв}$ создается разность потенциалов около 2,4 В, которая прикладывается плюсом к затвору и минусом к истоку, что превышает пороговое напряжение транзистора. У транзистора *SPP20N60C3* пороговое напряжение затвора $V_{GS(th)}$ = 2,1 В [4, 7], при напряжении 2,4 В транзистор находится в приоткрытом состоянии.

Рассмотренные эффекты приводят к дополнительному разогреву транзистора и зоны $R2$. Только в зоне $R2$ выделяется в виде тепла $P = U^2/R2 = 6002/25000 = 14{,}4$ Вт. В данном случае температура перегрева зоны $R2$ находится из соотношения [13, 14]:

$$\Delta T = R_{th} * P, \tag{2}$$

где R_{th} – значение эффективного теплового сопротивления для ПП, 0,9 °С/Вт; P – дополнительная мощность зоны $R2$, Вт.

Тогда перегрев зоны R2 составит $\Delta T = 14{,}4*0{,}9 = 12{,}96$ °С, что приведет к дальнейшему ухудшению параметров ПП, разогреву зоны перегрева и отказу электронного устройства.

Для снижения влияния этих эффектов и увеличения времени наработки электронного устройства на отказ предлагается включать электронный ключ преобразователя по схеме с ОС (ОК) (эмиттерный, истоковый повторитель) (рис. 2б). Когда транзисторный ключ открыт и энергия из сети передается в нагрузку, делитель из сопротивлений зон $R1$ и $R2$ шунтируется малым сопротивлением ключа. Таким образом, в зонах $R1$ и $R2$ не выделяется тепло и не происходит их разогрев, что и увеличивает время наработки электронного устройства на отказ.

С другой стороны, на затворе транзистора присутствует плавающее напряжение с амплитудой, равной входному напряжению преобразователя. Отсюда следует, что между затвором и формирователем импульсов управления необходима гальваническая развязка в виде импульсного трансформатора (рис. 3).

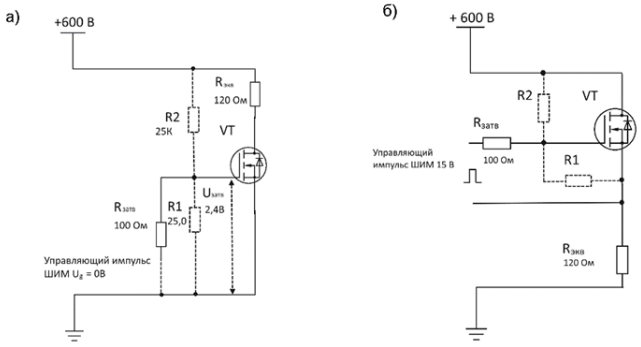


Рис. 2. Схема замещения фрагмента ПП с впаянным мощным транзистором при превышении температуры стеклования *Tg*: а) на ключе с общим эмиттером, истоком; б) на ключе с общим коллектором, стоком (эмиттерный, истоковый повторитель)

Fig. 2. Equivalent circuit of the printed circuit board fragment with a soldered-in high-power transistor when the glass transition temperature *Tg* is exceeded: a) a switch a common emitter, source circuit; b) a switch a common collector, drain (emitter, source follower) circuit

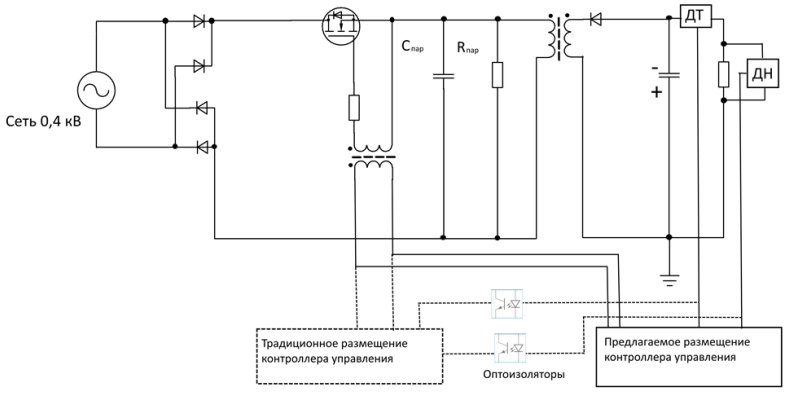


Рис. 3. Упрощенная топология *Flyback* преобразователя с инвертированной полярностью напряжения на выходе

Fig. 3. Simplified *Flyback* converter topology with inverted output voltage polarity

При наличии гальванической развязки между затвором и формирователем импульсов управления можно отказаться от оптоизоляторов и разместить контроллер управления на вторичной стороне преобразователя. Это дает преимущество перед традиционной топологией, снижает количество электронных компонентов и улучшает стабильность выходного напряжения. Стандартные высоковольтные оптоизоляторы добавляют 100 нс ко времени распространения сигналов измерения от вторичной части, что снижает максимальную частоту преобразования [1, 3]. Еще одно преимущество данной топологии – не требуется дополнительных компонентов для плавного пуска и выключателей. При подключенном преобразователе к сети и выключенном транзисторе на всех электрических цепях, паразитных емкостях $C_{пар}$ и сопротивлениях $R_{пар}$ (рис. 3) отсутствует разность потенциалов. Плавный пуск ИВП осуществляется контроллером управления.

Имитационная модель силовой части *Flyback* преобразователя (рис. 4) испытывалась в среде *Matlab Simulink* [7, 16]. В качестве сопротивлений зон перегрева в электрическую цепь включались резисторы $R1$ и $R2$ с характеристикой материала ПП из СТЭФ.

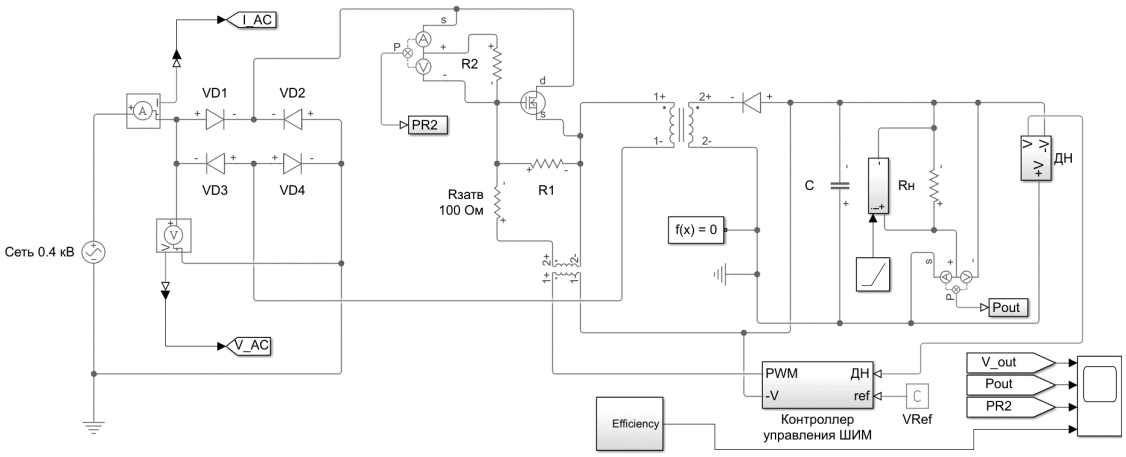


Рис. 4. Имитационная модель силовой части *Flyback* преобразователя

Fig. 4. Simulation model of the power section of the *Flyback* converter

Результаты и обсуждение

В ходе испытания имитационной модели выходное напряжение стабилизировалось, а мощность в нагрузке линейно нарастала. При этом вычислялись мощность, выделяемая в зоне перегрева *R*2, и общий КПД. Моделирование проводилось как для ключа с ОИ, так и для ключа с ОС при одинаковых условиях. В результате моделирования получены графики изменения этих величин во времени, которые представлены на рис. 5.

Из графика мощности, выделяемой в зоне *R*2 для ключа с ОИ (рис. 5а), видно, что слабо зависит от увеличения нагрузки. С учетом положительной обратной связи между сопротивлением зоны *R*2 и выделяемой мощностью, с учетом соотношения (1) это приведет к дальнейшему разогреву зоны, причем добавится действие приоткрытого состояния ключа. Для ключа с ОС

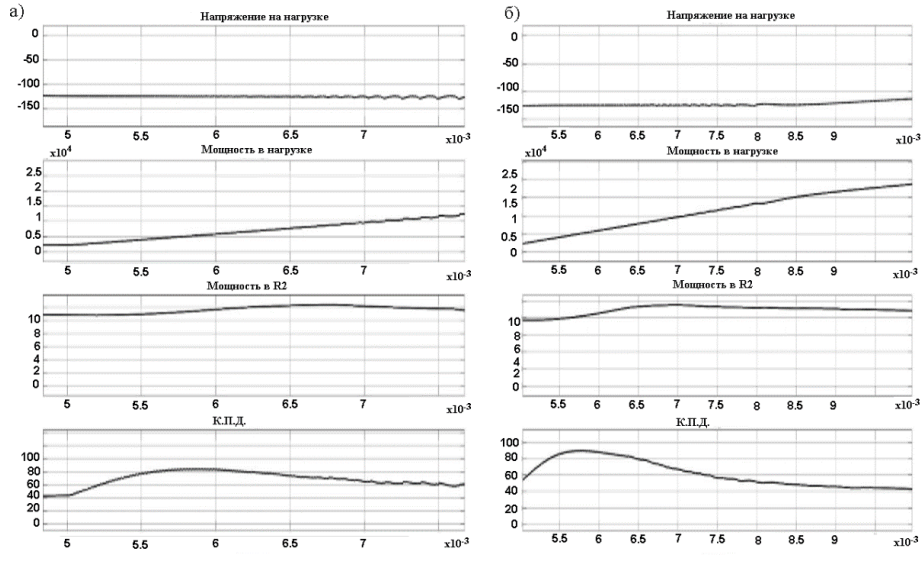


Рис. 5. Графики характеристик: а) для ключа с ОИ; б) для ключа с ОС

Fig. 5. Characteristic graphs: a) for a switch common-source circuit; b) for a switch common drain circuit

на графике (рис. 5б) заметно снижение выделяемой мощности, которое обусловлено главным образом закрытием приоткрытого ключа, так как известно, что увеличение потенциала на истоке приводит к снижению потенциала на затворе (обратная отрицательная связь). Дополнительно зона *R*2 шунтируется ключом. Таким образом, изложенные факты приведут к снижению температуры зоны *R*2. Также из графиков следует, что при приближении к максимальной нагрузке для ключа с ОИ напряжение на нагрузке имеет колебательный характер с увеличением амплитуды. Для ключа с ОС это явление отсутствует. Это означает, что отсутствие оптоизоляторов в цепи обратной связи снижает время отклика на изменение напряжения на нагрузке.

Заключение

В статье представлены результаты исследования разработанных имитационных моделей стандартной и предложенной концепции топологий. Показано, что предложенные концепции построения источника вторичного питания улучшают свойства разработанного устройства:

- снижают выделения мощности в зоне перегрева, что приводит к увеличению срока службы электронного устройства, а также уменьшают количество электронных компонентов и производственные затраты;
- обеспечивают быстрый отклик на изменение напряжения на нагрузке, что позволяет увеличивать частоту преобразования и, как следствие, улучшать характеристики источника вторичного питания.

Применение в разрабатываемой топологии ключа с общим коллектором, стоком увеличивает время наработки на отказ и позволяет отказаться от выключателей и пусковых токоограничивающих электронных компонентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Dong H., Xie X., Zhang L.** A new primary PWM control strategy for CCM synchronous rectification flyback converter, IEEE Transactions on Power Electronics, 35 (5) (2020) 4457–4461. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2944492

[2] **Haider W., Ha Q.P.** A lossless passive snubber for soft-switching of flyback converters, 2024 IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), (2024) 1–6. DOI: 10.1109/ICIEA61579.2024.10664895

[3] **Tang C.-Y., Lin W.-Z., Tan Y.-C.** An active clamp flyback converter with high precision primary-side regulation strategy, IEEE Transactions on Power Electronics, 37 (9) (2022) 10281–10289. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3162960

[4] **Sadikoglu F., Bakhtiari S., Babaei E.** Design of quasi-resonant flyback converter integrated by fuzzy controller, 15th International Conference on Applications of Fuzzy Systems, Soft Computing and Artificial Intelligence Tools (ICAFS), 610 (2023) 31–39. DOI: 10.1007/978-3-031-25252-5_10

[5] **Yu Y., Kong M., Yan J., Lu Y.** Optimization strategy for output voltage of CCM flyback converter based on linear active disturbance rejection control, Applied Sciences, 13 (23) (2023) 12786. DOI: 10.3390/app132312786

[6] **Li Y., You Y., Han Y., Guo W., Qian L., Zhu G.** An elimination scheme of long and short periods for flyback converter, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 70 (6) (2023) 2052–2056. DOI: 10.1109/TCSII.2023.3234410

[7] **Goudarzian A., Khosravi A., Raeisi H.A.** Modeling, design and control of a modified flyback converter with ability of right-half-plane zero alleviation in continuous conduction mode, Engineering Science and Technology, an International Journal, 26 (2021) 101007. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.011

[8] **Шугал Я.Л.** Фольгированные слоистые пластики в электротехнической промышленности. М.: Информстандартэлектро, 1968. 32 с.

[9] **Смельницкий Ф.С., Горелов Н.В., Коновалов П.Г.** Фольгированные слоистые пластики для печатных схем. М.: Энергия, 1969. 176 с.

[10] **Сотникова С.Ю., Кононова Н.А., Ландер Л.Б., Цветков В.Э., Яловнаров С.В.** Влияние печатных проводников на тепловой режим радиоэлектронных приборов, Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 65 (10) (2022) 712–724. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724

[11] **Панкин А.М., Коровкин Н.В.** Алгоритмы систем диагностирования новых энергетических объектов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 4 (254). С. 98–105. DOI: 10.5862/JEST.254.11

[12] **Wan Y., Huang H.** Thermal performance analysis and prediction of printed circuit boards, Journal of Circuits, Systems and Computers, 32 (13) (2023) 2350225. DOI: 10.1142/S0218126623502250

[13] **Лезинов А.** Расчет теплового сопротивления между переходом СВЧ МИС на печатной плате и окружающей средой // Электроника НТБ. 2017. № 5 (00165). С. 116–118. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.165.5.116.118

[14] **Vellvehi M., Perpiñà X., León J., Aviñó-Salvadó O., Ferrer C., Jordà X.** Local thermal resistance extraction in monolithic microwave integrated circuits, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68 (12) (2020) 12840–12849. DOI: 10.1109/TIE.2020.3040684

[15] **Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 1072 p.

[16] **Володин В.Я.** Малосигнальная модель обратноходового преобразователя // Практическая силовая электроника. 2022. № 2 (86). С. 14–25.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЫСТРОВ Александр Васильевич – *старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: stalex81@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9338-2535

ЗВЕРЕВ Сергей Геннадьевич – *заместитель директора Института энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: s.zverev@spbstu.ru

REFERENCES

[1] **H. Dong, X. Xie, L. Zhang,** A new primary PWM control strategy for CCM synchronous rectification flyback converter, IEEE Transactions on Power Electronics, 35 (5) (2020) 4457–4461. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2944492

[2] **W. Haider, Q.P. Ha,** A lossless passive snubber for soft-switching of flyback converters, 2024 IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), (2024) 1–6. DOI: 10.1109/ICIEA61579.2024.10664895

[3] **C.-Y. Tang, W.-Z. Lin, Y.-C. Tan,** An active clamp flyback converter with high precision primary-side regulation strategy, IEEE Transactions on Power Electronics, 37 (9) (2022) 10281–10289. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3162960

[4] **F. Sadikoglu, S. Bakhtiari, E. Babaei,** Design of quasi-resonant flyback converter integrated by fuzzy controller, 15th International Conference on Applications of Fuzzy Systems, Soft Computing and Artificial Intelligence Tools (ICAFS), 610 (2023) 31–39. DOI: 10.1007/978-3-031-25252-5_10

[5] **Y. Yu, M. Kong, J. Yan, Y. Lu,** Optimization strategy for output voltage of CCM flyback converter based on linear active disturbance rejection control, Applied Sciences, 13 (23) (2023) 12786. DOI: 10.3390/app132312786

[6] **Y. Li, Y. You, Y. Han, W. Guo, L. Qian, G. Zhu,** An elimination scheme of long and short periods for flyback converter, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 70 (6) (2023) 2052–2056. DOI: 10.1109/TCSII.2023.3234410

[7] **A. Goudarzian, A. Khosravi, H.A. Raeisi,** Modeling, design and control of a modified flyback converter with ability of right-half-plane zero alleviation in continuous conduction mode, Engineering Science and Technology, an International Journal, 26 (2021) 101007. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.011

[8] **Ia.L. Shugal,** Fol'girovannye sloistye plastiki v elektrotekhnicheskoi promyshlennosti [Foiled laminated plastics in the electrical industry]. Moscow: Informstandartelektro, 1968. 32 p.

[9] **F.S. Smel'nitskii, N.V. Gorelov, P.G. Konovalov,** Fol'girovannye sloistye plastiki dlia pechatnykh skhem [Foil laminated plastics for printed circuits]. Moscow: Energiia, 1969. 176 p.

[10] **S.Yu. Sotnikova, N.A. Kononova, L.B. Lander, V.E. Tsvetkov, S.V. Yalovnarov,** Influence of Printed Conductors on the Thermal Regime of Radio-Electronic Devices, Journal of Instrument Engineering, 65 (10) (2022) 712–724. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724

[11] **A.M. Pankin, N.V. Korovkin,** Algorithms of new power-producing objects diagnosis systems, St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology, 4 (254) (2016) 98–105. DOI: 10.5862/JEST.254.11

[12] **Y. Wan, H. Huang,** Thermal performance analysis and prediction of printed circuit boards, Journal of Circuits, Systems and Computers, 32 (13) (2023) 2350225. DOI: 10.1142/S0218126623502250

[13] **A. Lezinov,** Raschet teplovogo soprotivleniia mezhdu perekhodom SVCH MIS na pechatnoi plate i okruzhaiushchei sredoi [Calculation of thermal resistance between the junction of microwave microcircuits on a printed circuit board and the environment], Electronics: Science, Technology, Business, 5 (00165) (2017) 116–118. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.165.5.116.118

[14] **M. Vellvehi, X. Perpiñà, J. León, O. Aviñó-Salvadó, C. Ferrer, X. Jordà,** Local thermal resistance extraction in monolithic microwave integrated circuits, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68 (12) (2020) 12840–12849. DOI: 10.1109/TIE.2020.3040684

[15] **T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. DeWitt**, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 1072 p.

[16] **V.Ya. Volodin,** Small-signal model of a flyback converter, Prakticheskaia silovaia elektronika [Practical Power Electronics], 2 (86) (2022) 14–25.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexandre V. BYSTROV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: stalex81@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9338-2535

Sergey G. ZVEREV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: s.zverev@spbstu.ru

Поступила: 11.12.2024; Одобрена: 21.03.2025; Принята: 22.03.2025.
Submitted: 11.12.2024; Approved: 21.03.2025; Accepted: 22.03.2025.

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 88–101.
Global Energy, 2025, 31 (1); 88–101.

Научная статья
УДК 621.311
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31106

В. Хиат, А.Н. Беляев ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ andrey.belyaev@gmail.com

ПОДДЕРЖАНИЕ ЧАСТОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ И НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье представлены два метода, направленные на поддержание частоты энергосистемы с возобновляемыми источниками энергии. Первый метод включает в себя реализацию концепции виртуальной инерции, обеспечиваемой ветроэнергетической установкой (ВЭУ) третьего типа. Этот подход основан на анализе вариаций частотной характеристики ВЭУ, что позволяет оптимизировать реакцию системы на колебания частоты и повысить устойчивость энергосистемы. Второй метод предполагает использование системы накопления энергии (СНЭ), что способствует поддержанию устойчивости в условиях дефицита активной мощности. Результаты показывают, что ВЭУ с управлением виртуальной инерцией и интеграцией СНЭ, а также с использованием комбинированного подхода поддерживает стабильность частоты и улучшает динамическую реакцию энергосистемы.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, накопитель энергии, виртуальная инерция, асинхронный генератор двойного питания.

Для цитирования:

Хиат В., Беляев А.Н. Поддержание частоты энергосистемы на основе управления ветроэнергетической установкой и накопителем электроэнергии // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 88–101. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31106

© Хиат В., Беляев А.Н., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31106

W. Khiat, A.N. Belyaev ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ andrey.belyaev@gmail.com

GRID FREQUENCY SUPPORT WITH INTEGRATED DFIG-WIND TURBINE AND ENERGY STORAGE SYSTEM

Abstract. The article presents two methods aimed at maintaining the frequency of the power system. The first method involves calculation and implementation of virtual inertia control (VIC) provided by a Doubly-Fed Induction Generator (DFIG). This approach is based on analyzing variations in the frequency response of DFIG, enabling the optimization of system's reaction to frequency fluctuations and enhancing stability of the power system. The second method uses an energy storage system (ESS) to release energy, thereby supporting frequency stability during overload conditions. The results demonstrate that the DFIG, when supported by the additional VIC method and with the integration of ESS, or even with the combined approach supports frequency stability and improves the dynamic response of the overall energy system.

Keywords: wind turbine, energy storage system, virtual inertia, doubly-fed induction generator.

Citation:

Khiat W., Belyaev A.N., Grid frequency support with integrated DFIG-wind turbine and energy storage system, Global Energy, 31 (01) (2025) 88–101, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31106

Введение

Изменение частоты в энергосистеме может быть вызвано небалансом между производством и потреблением электрической энергии [1]. Основным источником энергии в электроэнергетических системах (ЭЭС) являются традиционные тепловые станции с синхронными генераторами большой мощности [2]. Однако из-за ограничения запасов топлива и новых экологических критериев проводимые в данный момент исследования в большей степени ориентированы на интеграцию возобновляемых источников энергии в ЭЭС [3].

Растущее проникновение ветрогенераторов в ЭЭС поставило новые задачи, такие как управление балансом мощности, частотой и устойчивостью в переходных процессах [4], и это, в свою очередь, приводит к созданию множества методов, исследованных в литературе и на практике, которые делятся на три основные категории: управление скоростью ротора, управление углом наклона и управление инерцией [5, 6]. Инерционная система играет чрезвычайно важную роль, поскольку она определяет чувствительность к колебаниям частоты при несбалансированном спросе [7]. При небалансах мощности изменение частоты традиционно носит инерционный характер [8]. Асинхронный генератор с двойным питанием (АГДП) является одним из наиболее часто используемых в ветроэлектрических установках (ВЭУ), с учетом его возможностей при интеграции прерывистой энергии ветра, но развязка механической части от электрической, вызванная типом управления преобразователем, не позволит ему реагировать на изменения частоты сети [9]. ВЭУ аккумулируют значительную кинетическую энергию благодаря вращению своих лопастей. Однако в случае турбин с регулируемой скоростью эта энергия не может быть равномерно использована в сети [10], поэтому требуется дополнительное управление для ее высвобождения.

© Khiat W., Belyaev A.N., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

С другой стороны, система накопления энергии (СНЭ) на сегодняшний день становится ключевым элементом для оптимизации работы сети. Она выполняет функции временного энергетического буфера, обеспечивая хранение энергии, поступающей от источников генерации, с последующей передачей ее к нагрузке или обратно в сеть. Это стратегическое решение направлено на достижение ряда целей, таких как выравнивание спроса и предложения, поддержание уровня напряжения, регулирование частоты, и других задач, способствующих устойчивости и эффективности работы энергосистемы [11].

На четырехмашинной модели Кундура с двумя зонами, одна из которых содержит ВЭУ, проведено исследование управления на уровне регулятора активной мощности в роторной части с целью высвобождения кинетической энергии ветряной турбины и поддержания частоты на основе метода виртуальной инерции (ВИ), а также с использованием СНЭ в программе Matlab/Simulink.

Моделирование АГДП в ВЭУ третьего типа

Предложенная в данной работе методика выделения скрытой инерции ВЭУ третьего типа является развитием метода отслеживания точки максимальной мощности – англ. Maximum Power Point Tracking (MPPT) [4]. Поэтому опишем динамическую модель и управление MPPT ветрогенератора третьего типа.

Согласно [12, 13], уравнения ветрогенератора третьего типа в синхронной системе отсчета *dq* может быть выражено следующим образом.

Дифференциальные уравнения для потокосцеплений статорных и роторных контуров:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= -R_s I_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_c \Psi_{qs}; \\ V_{ds} &= R_s I_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_c \Psi_{ds}; \\ V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (\omega_c - \omega_r)\Psi_{qr}; \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + (\omega_c - \omega_r)\Psi_{dr}; \end{aligned} \tag{1}$$

уравнения связи потокосцеплений с токами:

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= -L_s I_{ds} + L_m I_{dr}; \\ \Psi_{qs} &= -L_s I_{qs} + L_m I_{qr}; \\ \Psi_{dr} &= -L_r I_{dr} + L_m I_{ds}; \\ \Psi_{qr} &= -L_r I_{qr} + L_m I_{qs}; \end{aligned} \tag{2}$$

уравнения движения ротора:

$$T_m - T_e = J\frac{d\omega_r}{dt}; \quad T_e = \frac{3}{2} N_D L_m \left(i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}\right). \tag{3}$$

где ω_r – угловая скорость ротора, ω_c – синхронная угловая скорость сети, Ψ_s и Ψ_r – потоки статора и ротора, V_s и V_r – векторы напряжения статора и ротора, I_s и I_r – векторы тока статора и ротора, L_s и L_r – индуктивности статора и ротора, R_s и R_r – активные сопротивления статора и ротора, L_m – взаимная индуктивность, T_e – электромагнитный момент, T_m – механический момент, J – момент инерции.

Пренебрегая сопротивлениями статора и учитывая, что поток статора постоянный, можно получить уравнения электрического момента, активной и реактивной мощностей в соответствии с [14] следующим образом:

$$T_e = \frac{3L_m}{2\omega_c L_s} N_D V_s I_{dr};$$

$$P_e = \frac{3\omega_r L_m}{2\omega_c L_s} V_s I_{dr}; \qquad (4)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2L_s} V_s \left(\frac{V_s}{\omega_c} + L_m I_{qr} \right).$$

Согласно формуле (4), можно заметить развязку электромагнитного момента и реактивной мощности статора, поэтому их управление будет осуществляться только через ток ротора по осям *d* и *q* соответственно [4].

Векторное управление ВЭУ третьего типа

Система управления АГДП, используемая в данном исследовании, основана на регулировании преобразователя со стороны ротора. С его помощью поддерживается напряжение статора на желаемом опорном уровне, регулируется активная мощность, подаваемая в энергосистему и реализуется функция отслеживания точки максимальной мощности. Схема векторного управления преобразователя со стороны ротора ВЭУ изображена на рис. 1. В первую очередь вектор линейного напряжения используется для управления блоком фазового детектора, который выдает его угол, необходимый для выполнения прямых и обратных преобразований *abc*/*dq* токов линии, сетевых напряжений и управляющих сигналов. В *dq*-системе координат регулируемые токи и напряжения представляют собой постоянные величины. Поэтому можно использовать простые ПИ-регуляторы, что обеспечивает нулевые установившиеся ошибки. Наконец, управляющие напряжения, выданные контроллером, передаются в блок ШИМ, который создает управляющую последовательность для регулирования мощными транзисторами трехфазного инвертора.

Активная и реактивная мощности контролируются отдельно с помощью внешнего контура, который генерирует опорные сигналы тока *Ird** и *Irq** для управления на уровне внутреннего контура. Опорный сигнал активной мощности определяется в соответствии с кривой MPPT, показанной на рис. 2 (красная кривая).

В традиционной системе управления активной мощностью ее заданное значение, получаемое из кривой MPPT, определяется следующим образом [15]:

$$P_{\text{опт}} = \begin{cases} k_{\text{опт}} \omega_r^3 \left(\omega_0 < \omega_r < \omega_1 \right) \\ \dfrac{\left(P_{\text{макс}} - k_{\text{опт}} \omega_1^3 \right)}{\left(\omega_{\text{макс}} - \omega_1 \right)} \left(\omega_r - \omega_{\text{макс}} \right) + P_{\text{макс}} \left(\omega_1 < \omega_r < \omega_{\text{макс}} \right), \\ P_{\text{макс}} \left(\omega_r > \omega_{\text{макс}} \right) \end{cases} \qquad (5)$$

где ω_0, ω_1, $\omega_{макс}$ – угловые скорости ротора, рад/с, соответствующие точкам B, C и D рис. 2.

Для определения коэффициента оптимальной кривой $k_{опт}$ используем механическую характеристику ветрогенератора и получаем значение мощности, соответствующее некоторой скорости вращения ротора. Затем построим зависимости $P(\omega) = k_{опт}\omega^3$ в диапазоне скоростей механической характеристики при разных коэффициентах при кубе скорости (рис. 3).

По кривым можно определить, что коэффициент оптимальной механической характеристики находится в пределах от 0,5 до 0,6. Примем в данном исследовании коэффициент, равный 0,53.

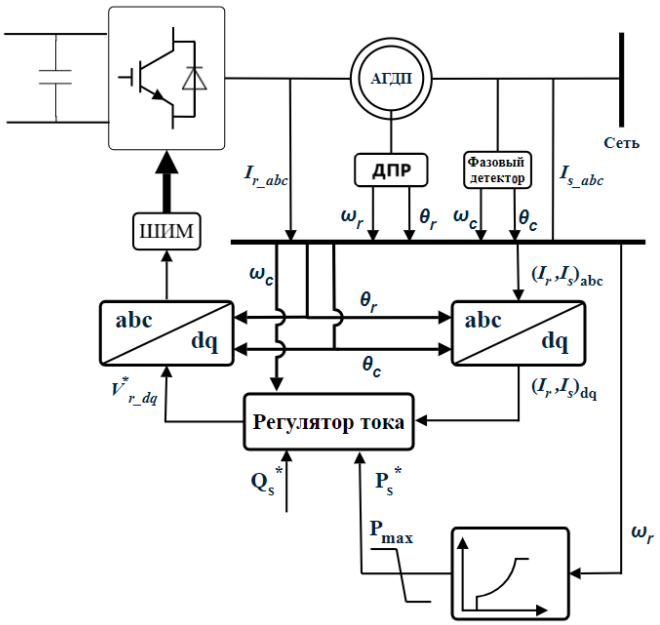


Рис. 1. Схема векторного управления преобразователя ВЭУ третьего типа со стороны ротора

Fig. 1. Vector control diagram of DFIG-wind turbine converter from rotor side

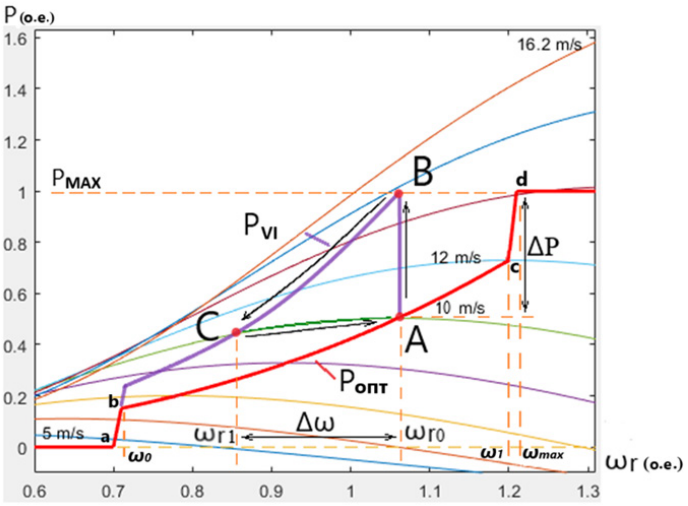


Рис. 2. Характеристика мощности турбины при введении ВИ

Fig. 2. Power characteristic of DFIG with virtual inertia control (VIC)

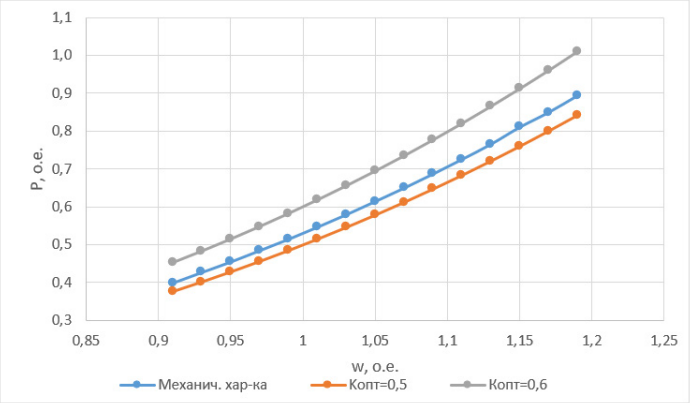


Рис. 3. Механическая характеристика и кривые кубических зависимостей от скорости при разных коэффициентах
Fig. 3. DFIG's mechanical characteristic and cubic dependency curves on speed at different coefficients

Реализация концепции ВИ за счет алгоритма инверторного регулирования

В MPPT регулирование осуществляется исключительно за счет изменения скорости ротора, который отделен от частоты сети с помощью преобразователя [16]. Однако этот подход не обеспечивает эффективного извлечения скрытой энергии турбины в условиях небаланса мощности в системе. Поэтому требуется усовершенствовать систему управления, добавив контур изменения частоты, чтобы иметь возможность высвободить инерцию ВЭУ. При нормальной работе и с определенной частотой системы ВЭУ третьего типа работает в точке A под управлением MPPT (рис. 2). При изменении частоты системы режим работы перемещается в точку B, и ВЭУ переходит в режим ВИ. В результате скорость ротора начинает снижаться, кинетическая энергия, накопленная в процессе вращения, высвобождается для поддержания частоты и происходит переход в точку C. Регулирование активной мощности турбины достигается за счет изменения коэффициента $k_{\text{опт}}$ кривой MPPT на коэффициент ВИ $k_{\text{вир}}$. Принцип работы дополнительной цепи управления показан на рис. 4.

Согласно [4], при условии постоянства механической мощности турбины и скорости ветра соотношение между мощностью в точке A и точке C можно выразить следующим образом:

$$k_{\text{вир}}\omega_{r1}^3 \approx k_{\text{опт}}\omega_{r0}^3, \tag{6}$$

где ω_{r1} может быть выражено через угловую скорость синхронную с сетью в формуле (5):

$$\omega_{r1} = \omega_{r0} + \Delta\omega_r = \omega_{r0} + \lambda\Delta\omega_c = \omega_{r0} + \lambda 2\pi\Delta f, \tag{7}$$

где λ – угловой коэффициент инерции, равный отношению $\Delta\omega_r/\Delta\omega_c$.

Подставляя (7) в (6), получим формулу расчета коэффициента управления ВИ $k_{\text{вир}}$:

$$k_{\text{вир}} = \frac{\omega_{r0}^3}{\left(\omega_{r0} + \lambda 2\pi\Delta f\right)^3} k_{\text{опт}}. \tag{8}$$

Применение методики ВИ в тестовой модели энергосистемы

Для проверки реакции ветрогенератора с ВИ на высвобождение дополнительной активной мощности в сети выполним расчеты переходных процессов в Matlab/Simulink модели Кундура с двумя зонами, показанными на рис. 5.

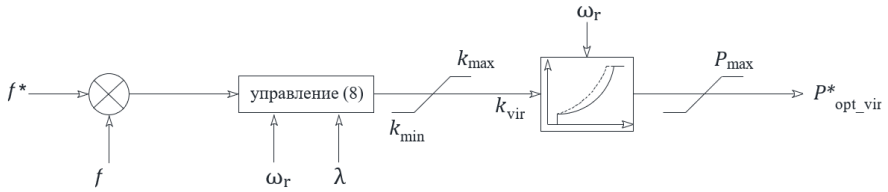


Рис. 4. Принцип работы цепи ВИ
Fig. 4. Principal diagram of VIC

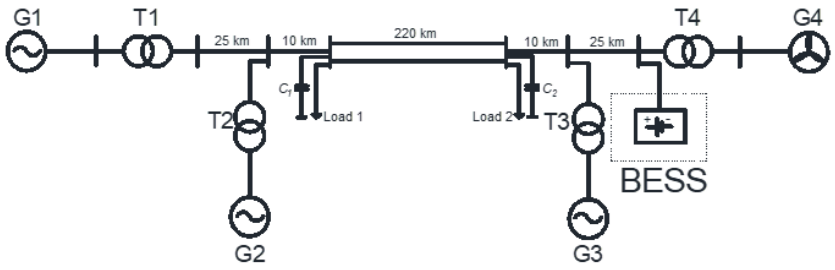


Рис. 5. Схема рассматриваемой четырехмашинной энергосистемы
Fig. 5. Diagram of four-machines Kundur power system

Первая зона содержит два синхронных генератора *G*1 и *G*2. Мощность первой зоны составляет 4,709 и 8,750 МВт соответственно, при этом нагрузка (Load 1) равна 12,9 МВт. Вторая зона включает синхронный генератор *G*3 и ветрогенератор *G*4 мощностью 7,19 МВт и 9 МВт соответственно, с нагрузкой (Load 2) 12,87 МВт. Две батареи статических конденсаторов *C*1 и *C*2 установлены параллельно нагрузкам Load 1 и Load 2 соответственно, для компенсации реактивной мощности и поддержания напряжения по концам протяженной (220 км) линии связи между зонами. Их общая реактивная мощность составляет 4,5 Мвар. Базисные мощность и напряжение системы равны 9 МВт и 25 кВ соответственно.

Скорость ветра считается постоянной и равной 10 м/с. Примем, что активная мощность генератора *G*3 уменьшилась на 15% на 40-й секунде. ВЭУ переключается из режима MPPT в режим ВИ после уменьшения частоты на 0,1 Гц. На рис. 6*а* показана разница в изменении частоты с учетом ВИ и без нее. Из графика видно, что управление ВИ помогло системе, увеличив минимальное значение частоты с 59,831 до 59,971 Гц, и даже в установившемся режиме кривая частоты при управлении ВИ приближается к 59,987 Гц, а кривая при использовании управления MPPT практически стабилизируется на 59,893 Гц. Аналогично напряжение во второй области (рис. 6*б*) падает до 0,992 о.е. при управлении MPPT и остается равным 1,001 о.е. с использованием ВИ. Кривые управления ВИ будут располагаться выше, чем кривые управления MPPT, в течение 5 секунд.

Сравнение динамических характеристик активной мощности с регулятором ВИ и без него показано на рис. 7. При резком снижении выработки активной мощности в энергосистеме на 15% у генератора G3 ветротурбина увеличила свою выходную мощность на 0,104 о.е. (т.е. на 1,248 МВт) при управлении ВИ, что привело к замедлению ротора, т.е. механическая мощность снизилась до 0,677 о.е. При управлении же MPPT электрическая и механическая мощности остаются неизменными.

Этот эффект поддерживает систему в течение первых 5 секунд отклонения частоты, однако при отсутствии накопителя ВЭУ не может самостоятельно обеспечивать поддержку системы на более длительный промежуток времени.

a) *b*)

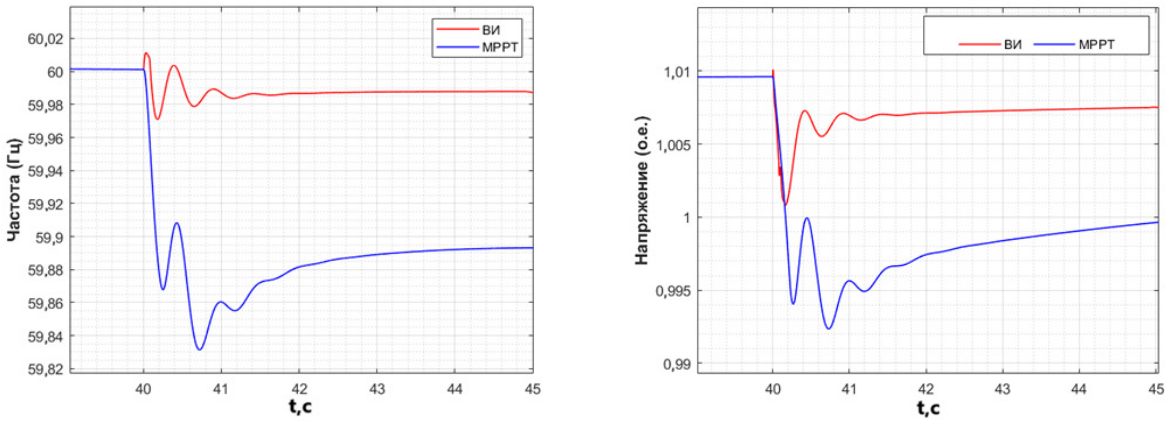


Рис. 6. Изменение частоты в Гц (*а*) и напряжения на шинах генератора *G*3 в о.е. (*б*) (синие кривые – регулятор MPPT, красные – регулятор ВИ)

Fig. 6. Frequency variation in Hz (*a*) and bus voltage of generator No. 3 in p.u. (*b*) (blue curves – MPPT controller, red curves – VIC)

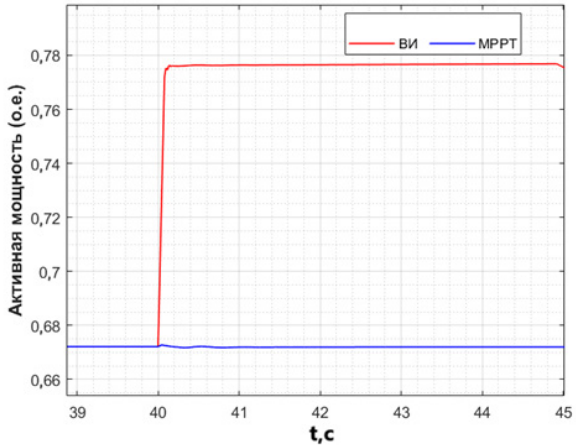


Рис. 7. Выдаваемая активная мощность ВЭУ в о.е. (синяя кривая – регулятор MPPT, красная – регулятор ВИ)

Fig. 7. Active power output of DFIG in p.u. (red curves – VIC, blue curves – MPPT controller)

Интеграция СНЭ в ЭЭС с ВЭУ

Накопитель моделируется источником тока, подключенным к шинам ВЭУ (на рис. 5 обозначен как BESS – Battery Energy Storage System). СНЭ управляется за счет изменения частоты для высвобождения энергии в случаях перегрузки сети или снижения производства электрической энергии. Отклонение частоты является входным сигналом системы регулирования накопителя. Входной сигнал определяет необходимые уровни выдачи или потребления в зависимости от режима работы накопителей. Когда входной сигнал положительный, система функционирует как потребитель мощности, накапливая ее в аккумуляторной батарее. При отрицательном входном сигнале система выдает активную мощность, и накопители начинают разряжаться.

a) *b*)

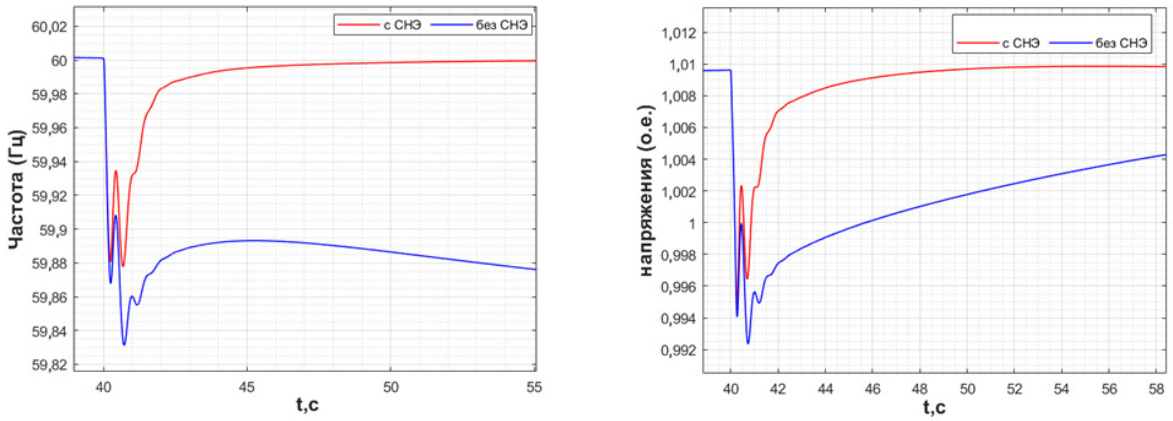


Рис. 8. Изменение частоты в Гц (*a*) и напряжение на шинах генератора *G*3 в о.е. (красные кривые – при использовании СНЭ и синие – без СНЭ) (*б*)

Fig. 8. Frequency variation in Hz (*a*) and bus voltage of generator No. 3 in p.u. (*b*) (red curves – with ESS, blue curves – without ESS)

Рассмотрим аналогичный случай, когда мощность генератора *G*3 падает на 15% на 40-й секунде. Полученные результаты показаны на рис. 8.

На рис. 8 видно, что после интеграции СНЭ частота, измеренная на шинах генератора *G*3, вернулась к номинальному значению в течение 13 секунд после снижения до 59,88 Гц. По сравнению с первоначальным опытом (без ВИ и без накопителя), где частота продолжала снижаться до 59,83 Гц, использование системы накопления оказалось весьма эффективным, поскольку стабилизировало частоту на уровне 60 Гц.

Аналогичная ситуация наблюдается с напряжением, измеренным на шинах *G*3, которое также эффективно поддерживается системой накопления. Активная мощность, подаваемая системой накопления на шины № 4, начала увеличиваться до 0,124 о.е. сразу после снижения частоты на 0,01 Гц (рис. 9).

Сравнение реакции энергосистемы при применении различных методов регулирования

Для того чтобы наглядно показать разницу между предыдущими способами поддержания частоты энергосистемы, ниже представлены результаты, полученные при тестировании с управлением ВИ, СНЭ, а также ВИ и СНЭ одновременно (рис. 10).

Кривые на рис. 10*a* показывают различные изменения частоты напряжения на шинах генератора *G*3. При управлении ВИ частота снижается до 59,979 Гц, затем повышается до 59,987 Гц в течение первых 5 секунд после снижения генерации, но затем снова падает до 59,820 Гц. При использовании СНЭ частота снижается до 59,88 Гц, затем повышается и стабилизируется на номинальном уровне через 13 секунд. Третья кривая, полученная при одновременном использовании обоих методов (управление ВИ и СНЭ), показывает, что частота снижается до 59,982 Гц после окончания эффекта ВИ, затем повышается и достигает номинального значения через 30 секунд, что отражает комбинированный и компенсирующий эффект двух механизмов регулирования частоты.

На рис. 10*б* показано, что при управлении ВИ напряжение снижается до 1,001 о.е. и приближается к номинальному значению в течение 60 секунд. При использовании СНЭ напряжение снижается до 0,995 о.е. и достигает номинального значения за 30 секунд. При одновременном применении обоих методов напряжение снижается до 1,001 о.е. и возвращается к исходному состоянию через 45 секунд.

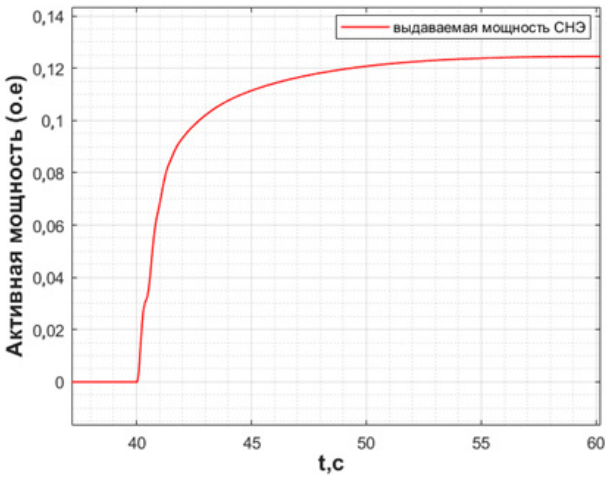


Рис. 9. Выдача активной мощности накопителем в о.е.
Fig. 9. Active power output of the energy storage system in p.u.

a) *b*)

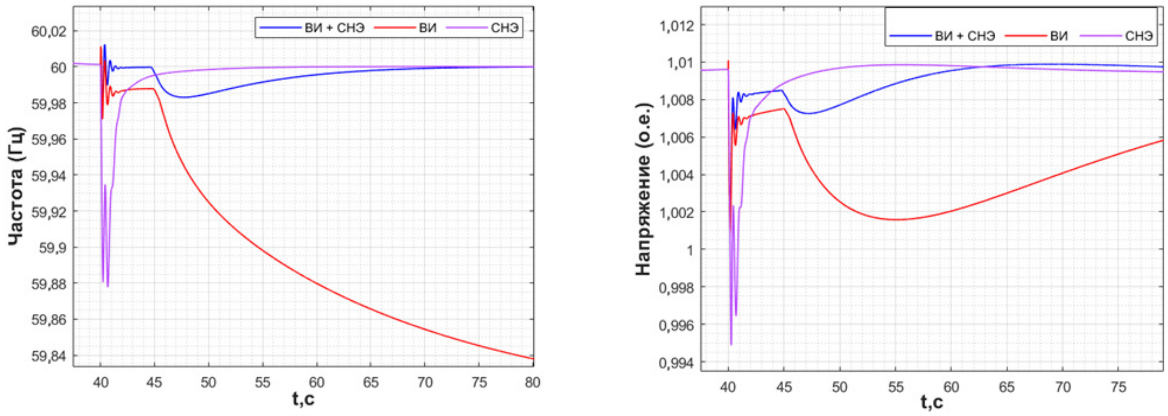


Рис. 10. Изменение частоты сети (*a*) и напряжение на шинах второй области (*б*)
(красная кривая – регулятор ВИ, фиолетовая – с СНЭ и синяя – ВИ + СНЭ)
Fig. 10. Power system frequency variation (*a*) and voltage at bus of second area (*b*)
(red curve – VIC controller, purple – with ESS, and blue – VIC + ESS)

На рис. 11 показано, что мощность, предоставляемая СНЭ и ветроустановкой, комбинируется для повышения частоты до ее номинального значения. При этом СНЭ демонстрирует гибкость и работает в координации с ветроустановкой.

Выводы

Предложена методика высвобождения и расчета ВИ, выдаваемой ветроэлектростанцией на базе ВЭУ третьего типа для поддержания частоты ЭЭС. В программе Matlab/Simulink создана тестовая четырехмашинная модель (разработанная на основе схемы Кундура) для проверки надежности предложенного метода в сети. Показано, что ВЭУ не может самостоятельно поддерживать и компенсировать резкие и внезапные изменения баланса мощности в ЭЭС. Выброс кинетической энергии, заблокированной в роторе, в сеть благодаря методу управления ВИ обеспечивает

a) *b*)

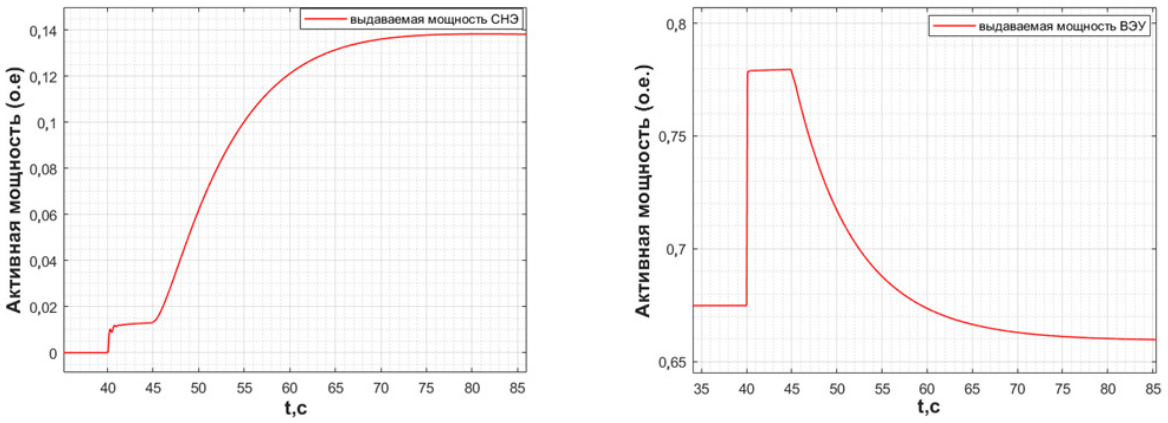


Рис. 11. Выдача активной мощности накопителем (*а*) и ВЭУ (*б*) при одновременном регулировании СНЭ и ВИ
Fig. 11. Active power output of battery (*a*) and DFIG (*b*) while using VIC and ESS

поддержание частоты сети во время внезапного увеличения нагрузки или снижения генерации. Поскольку управление ВИ имеет ограниченный по времени ресурс, предложено использование системы накопления электрической энергии, которая компенсирует потери производства в сети. Частота поднялась до исходного значения благодаря мощности, отдаваемой аккумуляторной батареей.

Таким образом, наиболее целесообразным является совместное применение метода ВИ для регулирования в первые несколько секунд переходного процесса и СНЭ для поддержания частоты и напряжения и возврата ЭЭС к номинальному режиму.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Rousseau J., Vorwerk J., Avramiotis I., Welti C., Hug G.** Employing imbalance forecasts to proactively counteract deterministic frequency deviations, 2023 IEEE Belgrade PowerTech, (2023) 1–6. DOI: 10.1109/PowerTech55446.2023.10202798

[2] **Guo X., Lou S., Wu Y., Wang Y.** Low-carbon operation of combined heat and power integrated plants based on solar-assisted carbon capture, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 10 (5) (2022) 1138–1151. DOI: 10.35833/MPCE.2021.000046

[3] **Zhao Y.** A Review of Renewable Energy and Power System Integration, Applied and Computational Engineering, 126 (1) (2025) 10–15. DOI: 10.54254/2755-2721/2025.20092

[4] **Zhu X., Wang Y., Xu L., Zhang X., Li H.** Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines for dynamic grid frequency support, IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011), (2011) 1–6. DOI: 10.1049/cp.2011.0189

[5] **Žertek A., Verbič G., Pantoš M.** Optimised control approach for frequency-control contribution of variable speed wind turbines, IET Renewable Power Generation, 6 (1) (2012) 17–23. DOI: 10.1049/iet-rpg.2010.0233

[6] **Ma H.T., Chowdhury B.H.** Working towards frequency regulation with wind plants: Combined control approaches, IET Renewable Power Generation, 4 (4) (2010) 308–316. DOI: 10.1049/iet-rpg.2009.0100

[7] **Chen P., Qi C., Chen X.** Virtual inertia estimation method of DFIG-based wind farm with additional frequency control, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 9 (5) (2021) 1076–1087. DOI: 10.35833/MPCE.2020.000908

[8] **Zhang Z., Preece R.** Effects of inertia distribution on regional frequency heterogeneity, Electric Power Systems Research, 231 (2024) 110340. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110340

[9] **Hao L., Ji J., Xie D., Wang H., Li W., Asaah P.** Scenario-based unit commitment optimization for power system with large-scale wind power participating in primary frequency regulation, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 8 (6) (2020) 1259–1267. DOI: 10.35833/MPCE.2019.000418

[10] **Okonkwo P.C., Mansir I.B., Al Housni F., Beitelmal W.H., Al Kaaf K., Ogunleye G.J.** Chapter 8 – Provision of kinetic energy support from wind turbines for frequency regulation services in the modern grid, Advanced Frequency Regulation Strategies in Renewable-Dominated Power Systems, (2024) 167–180. DOI: 10.1016/B978-0-323-95054-1.00018-4

[11] **Tan R.H.G., Tinakaran G.K.** Development of battery energy storage system model in MATLAB/Simulink, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 9 (1) (2020) 180–188. DOI: 10.12720/sgce.9.1.180-188

[12] **Tapia A., Tapia G., Ostolaza J.X., Saenz J.R.** Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator, IEEE Transactions on Energy Conversion, 18 (2) (2003) 194–204. DOI: 10.1109/TEC.2003.811727

[13] **Xu L., Wang Y.** Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions, IEEE Transactions on Power Systems, 22 (1) (2007) 314–323. DOI: 10.1109/TPWRS.2006.889113

[14] **Tapia-O. R., Aguilar-M. O., García-B. A., Santos-S. O.J.** Adaptive PI controllers for doubly fed induction generator using B-spline artificial neural networks, International Journal of Computer Applications, 80 (16) (2013) 37–42. DOI: 10.5120/13956-1949

[15] **Денисенко А.И., Смоловик С.В., Чудный В.С.** Динамическое поддержание частоты в энергосистеме за счет асинхронизированного синхронного ветрогенератора // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2022. Т. 2, № 87. С. 5–10.

[16] **Junyent-Ferr A., Pipelzadeh Y., Green T.C.** Blending HVDC-link energy storage and offshore wind turbine inertia for fast frequency response, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6 (3) (2015) 1059–1066. DOI: 10.1109/TSTE.2014.2360147

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ХИАТ Валид – *аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, PhD.*
E-mail: hiat.v@edu.spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8823-8104

БЕЛЯЕВ Андрей Николаевич – *профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

REFERENCES

[1] **J. Rousseau, J. Vorwerk, I. Avramiotis, C. Welti, G. Hug,** Employing imbalance forecasts to proactively counteract deterministic frequency deviations, 2023 IEEE Belgrade PowerTech, (2023) 1–6. DOI: 10.1109/PowerTech55446.2023.10202798

[2] **X. Guo, S. Lou, Y. Wu, Y. Wang,** Low-carbon operation of combined heat and power integrated plants based on solar-assisted carbon capture, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 10 (5) (2022) 1138–1151. DOI: 10.35833/MPCE.2021.000046

[3] **Y. Zhao,** A Review of Renewable Energy and Power System Integration, Applied and Computational Engineering, 126 (1) (2025) 10–15. DOI: 10.54254/2755-2721/2025.20092

[4] **X. Zhu, Y. Wang, L. Xu, X. Zhang, H. Li,** Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines for dynamic grid frequency support, IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011), (2011) 1–6. DOI: 10.1049/cp.2011.0189

[5] **A. Žertek, G. Verbič, M. Pantoš,** Optimised control approach for frequency-control contribution of variable speed wind turbines, IET Renewable Power Generation, 6 (1) (2012) 17–23. DOI: 10.1049/iet-rpg.2010.0233

[6] **H.T. Ma, B.H. Chowdhury,** Working towards frequency regulation with wind plants: Combined control approaches, IET Renewable Power Generation, 4 (4) (2010) 308–316. DOI: 10.1049/iet-rpg.2009.0100

[7] **P. Chen, C. Qi, X. Chen,** Virtual inertia estimation method of DFIG-based wind farm with additional frequency control, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 9 (5) (2021) 1076–1087. DOI: 10.35833/MPCE.2020.000908

[8] **Z. Zhang, R. Preece,** Effects of inertia distribution on regional frequency heterogeneity, Electric Power Systems Research, 231 (2024) 110340. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110340

[9] **L. Hao, J. Ji, D. Xie, H. Wang, W. Li, P. Asaah,** Scenario-based unit commitment optimization for power system with large-scale wind power participating in primary frequency regulation, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 8 (6) (2020) 1259–1267. DOI: 10.35833/MPCE.2019.000418

[10] **P.C. Okonkwo, I.B. Mansir, F. Al Housni, W.H. Beitelmal, K. Al Kaaf, G.J. Ogunleye,** Chapter 8 – Provision of kinetic energy support from wind turbines for frequency regulation services in the modern grid, Advanced Frequency Regulation Strategies in Renewable-Dominated Power Systems, (2024) 167–180. DOI: 10.1016/B978-0-323-95054-1.00018-4

[11] **R.H.G. Tan, G.K. Tinakaran,** Development of battery energy storage system model in MATLAB/Simulink, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 9 (1) (2020) 180–188. DOI: 10.12720/sgce.9.1.180-188

[12] **A. Tapia, G. Tapia, J.X. Ostolaza, J.R. Saenz,** Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator, IEEE Transactions on Energy Conversion, 18 (2) (2003) 194–204. DOI: 10.1109/TEC.2003.811727

[13] **L. Xu, Y. Wang,** Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions, IEEE Transactions on Power Systems, 22 (1) (2007) 314–323. DOI: 10.1109/TPWRS.2006.889113

[14] **R. Tapia-O., O. Aguilar-M., A. García-B., O.J. Santos-S.,** Adaptive PI controllers for doubly fed induction generator using B-spline artificial neural networks, International Journal of Computer Applications, 80 (16) (2013) 37–42. DOI: 10.5120/13956-1949

[15] **A.I. Denisenko, S.V. Smolovik, V.S. Chudnyi,** Dinamicheskoe podderzhanie chastoty v energosisteme za schet asinkhronizirovannogo sinkhronnogo vetrogeneratora [Dynamic frequency maintenance in the power system using an asynchronous synchronous wind generator], Izvestiya NTC Edinoj Energeticheskoj Sistemi [STC of Unified Power System Proceedings], 2 (87) (2022) 5–10

[16] **A. Junyent-Ferr, Y. Pipelzadeh, T.C. Green,** Blending HVDC-link energy storage and offshore wind turbine inertia for fast frequency response, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6 (3) (2015) 1059–1066. DOI: 10.1109/TSTE.2014.2360147

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Walid KHIAT – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: hiat.v@edu.spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8823-8104

Andrey N. BELYAEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

Поступила: 10.03.2025; Одобрена: 24.03.2025; Принята: 26.03.2025.
Submitted: 10.03.2025; Approved: 24.03.2025; Accepted: 26.03.2025.

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 102–111.
Global Energy, 2025, 31 (1); 102–111.

Металлургия. Материаловедение
Metallurgy. Material Science

Научная статья
УДК 621.762.22
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31107

А.Э. Ким ✉ , *А.К. Мазеева*, *Н.Г. Разумов*,
Е.В. Волокитина, *А.А. Попович*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ artem_7.kim@mail.ru

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАГНИТНОГО ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА $FE_6CO_6AL_3NI_2MN$

Аннотация. В данной работе получен высокоэнтропийный сплав $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ методом механического легирования. Изучены микроструктура, фазовый и гранулометрический составы порошка. Методом искрового плазменного спекания с последующей термической обработкой получены образцы выбранного сплава с пористостью менее 0,04%. Фазовый состав образцов после отжига при температурах 900, 950 и 1000°C состоит из двух ОЦК-фаз с близким параметром решетки. Установлено влияние температуры отжига на механические (твердость и прочность на сжатие) и магнитные свойства материалов. Прочность на сжатие образцов составила от 2163 до 2677 МПа, микротвердость – от 646 до 718 HV.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, механическое легирование, искровое плазменное спекание, CALPHAD.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2024-004 от 17.01.2024.

Для цитирования:

Ким А.Э., Мазеева А.К., Разумов Н.Г., и др. Структура и свойства магнитного высокоэнтропийного сплава $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 102–111. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31107

© Ким А.Э., Мазеева А.К., Разумов Н.Г., и др., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31107

A.E. Kim ✉ *, A.K. Mazeeva, N.G. Razumov, E.V. Volokitina, A.A. Popovich*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ artem_7.kim@mail.ru

STRUCTURE AND PROPERTIES OF MAGNETIC HIGH-ENTROPY ALLOY $FE_6CO_6AL_3NI_2MN$

Abstract. In this work, high-entropy $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ alloy was obtained by mechanical alloying. The microstructure, phase and granulometric compositions of the powder were studied. Samples of the selected alloy with a porosity of less than 0.04% were obtained by spark plasma sintering followed by heat treatment. The phase composition of the samples after annealing at temperatures of 900, 950 and 1000°C consists of two body-centered cubic phases with a close lattice parameter. The effect of annealing temperature on the mechanical (hardness and compressive strength) and magnetic properties of the materials was established. The compressive strength of the samples ranged from 2163 to 2677 MPa, microhardness – from 646 to 718 HV.

Keywords: high-entropy alloy, mechanical alloying, spark plasma sintering, CALPHAD.

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment 075-03-2024-004 dated 17.01.2024.

Citation:

Kim A.E., Mazeeva A.K., Razumov N.G., et al., Structure and properties of magnetic high-entropy alloy $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$, Global Energy, 31 (01) (2025) 102–111, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31107

Введение. Сегодня остро ощущается потребность в продукции электротехнической промышленности: электродвигателях, трансформаторах, генераторах, электромагнитах, датчиках магнитного поля и т.д. Поскольку электродвигатели потребляют огромное количество энергии, даже незначительное увеличение характеристик вносит существенный вклад в снижение выбросов CO_2 и снижение себестоимости продукции. Свойства используемых материалов существенно влияют на энергоэффективность и экономическую эффективность [1].

Одной из серьезных проблем отрасли является нехватка магнитомягких материалов с хорошими механическими и химическими свойствами. Традиционные сплавы имеют определенные ограничения [2]. Используемые электротехнические стали показывают высокие магнитные свойства, но имеют низкую пластичность из-за высокой степени структурной упорядоченности [3]. Это обстоятельство ограничивает срок службы и условия эксплуатации изделий. Кроме того, от современных магнитомягких сплавов требуется работа при высоких температурах, в агрессивных средах и т.д. Например, магнитные материалы, используемые в аэрокосмической промышленности, должны обладать хорошей жаропрочностью. Аморфные магнитомягкие материалы обладают отличной коррозионной стойкостью и высоким удельным электрическим сопротивлением [4]. Однако условия производства не позволяют получать объемные аморфные сплавы. Кроме того, невысокая температура кристаллизации значительно сужает области применения аморфных веществ.

© Kim A.E., Mazeeva A.K., Razumov N.G., et al., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Разнообразие высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) позволяет получать ряд уникальных механических, химических и функциональных свойств. Магнитные ВЭС могут сочетать в себе преимущества аморфных и традиционных магнитомягких сплавов. Фазовый состав, микроструктура и макроструктура материалов сильно зависят от условий синтеза. ВЭС являются одними из самых перспективных магнитомягких материалов благодаря возможности формирования компактных изделий, отличной деформируемости, коррозионной и термической стойкости и хорошим функциональным свойствам.

Тройной сплав FeCoNi образует однофазный твердый раствор замещения с ГЦК-структурой. ГЦК-сплавы имеют высокую намагниченность насыщения в отличие от ОЦК-сплавов, что обусловлено более высокой плотностью упаковки атомов и высоким содержанием ферромагнитных элементов [5]. В работе [4] показано, что Cr существенно улучшает коррозионностойкие свойства за счет образования оксидной пленки. Изучено влияние Mn, Al и Ti на структурные свойства сплава NiCoCrFe [5–7]. Результаты показали, что добавление этих элементов привело к значительному увеличению предела текучести и уменьшению пластической деформации [9–12].

Легирование Si и Cu улучшает механические свойства магнитомягких ВЭС за счет измельчения зерна. В [13] получен сплав $FeCoNiCu_{0.2}Si_{0.2}$ с сочетанием хороших магнитных и прочностных свойств. Сплав с добавлением Zr показывает высокую твердость и износостойкость, но магнитное насыщение уменьшается на 15%, а коэрцитивная сила увеличивается на 133% [2]. Также существуют исследования по легированию ВЭС редкоземельными элементами Nd, Pr, Y, Ho с целью улучшения механических свойств. Добавление 5 ат. % Ho в $FeCoNi(CuAl)_{0.8}$ уменьшает размер зерна, увеличивает долю ОЦК-фазы и улучшает магнитные свойства [14, 15].

Целью данной работы было создание новых высокоэнтропийных материалов с сочетанием высоких механических и магнитомягких свойств методами механического легирования и искрового плазменного спекания, изучение физико-химических особенностей формирования структуры сплавов в зависимости от технологических режимов и влияния получаемого структурного состояния на функциональные свойства материалов.

Материалы и методы исследования

Фазовая диаграмма сплава $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ получена с использованием метода CALPHAD (CALculation of PHAse Diagrams). Для получения сплава был применен метод механического легирования (МЛ), которое проводилось в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 4 из элементарных порошков Fe, Co, Al, Ni, Mn (чистота 99,9%) размером 40–100 мкм. Продолжительность процесса составила 25 часов. Каждые 20 минут оборудование останавливалось на 10 минут для предотвращения перегрева стаканов, мелющих тел и порошка. Внешний радиус каждого из стаканов был равен 37,5 мм, а планетарного диска – 130 мм. Масса размольных шаров превышала массу порошка в 20 раз. Перед проведением МЛ стаканы продувались аргоном в течение 7 минут.

Микроструктура порошков $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ анализировалась с использованием сканирующего электронного микроскопа Mira Tescan, оснащенного энергодисперсионным детектором EDX Oxford Instruments X-Max 80 для рентгеноспектрального анализа.

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре фирмы Bruker D8 Advance с медным излучением (λ = 1,5443 Å). Анализ размера частиц образцов после МЛ проводили на лазерном гранулометре Fritsch Analysette 22 NanoTec plus с использованием модели Фраунгофера.

Порошки после МЛ консолидировали методом искрового плазменного спекания (ИПС) в установке HPD 25 FCT Systeme GmbH SPS при температуре 1200°C с выдержкой в течение 5 минут. Давление составляло 50 МПа. Диаметр цилиндрической графитовой пресс-формы составил 20 мм. Для измерения микротвердости по Виккерсу были изготовлены полированные образцы. Испытания проводились на цифровом микротвердомере BUEHLER MicroMet. Тестовая нагрузка составила 300 г. Исследование прочности на сжатие проводилось на универсальной разрывной

машине Zwick/Roell Z050. Для исследования магнитных свойств полученных образцов использовался вибрационный магнитометр Lake Shore 7410. Температура измерения составляла 293 K, диапазон напряженности магнитного поля – от –10000 до 10000 Э.

Результаты и обсуждение

На рис. 1а представлены изображения с растрового электронного микроскопа порошка $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ после 25 часов МЛ. В порошке наблюдается гомогенная микроструктура, результаты энергодисперсионного анализа говорят о равномерном распределении элементов [16]. Химический состав порошка представлен в табл. 1. Гранулометрический состав порошка составил d10 = 7 мкм, d50 = 19 мкм, d90 = 37 мкм.

На дифрактограмме порошка после МЛ (рис. 1б) видны пики единственной ОЦК-фазы. Параметр решетки составил 2,867 Å. Размер областей когерентного рассеяния составил 15 нм, а величина микронапряжений $e_0 = 0{,}009$.

Таблица 1

Химический состав механически легированного порошка

Table 1

Chemical composition of mechanically alloyed powder

Fe, ат. %	Co, ат. %	Al, ат. %	Ni, ат. %	Mn, ат. %
30,3±0,6	28,1±0,8	22,3±0,4	14,3±0,3	5,0±0,2

Пористость образцов после консолидации методом ИПС была менее 0,04%. После спекания образцы отжигали при температурах 900, 950 и 1000°C.

На рис. 2а представлена фазовая диаграмма сплава $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$, полученная в результате термодинамического расчета методом CALPHAD. При температурах выше 1050 K выбранный сплав образует однофазный ОЦК – твердый раствор. При температурах ниже 1050 K ОЦК-фаза распадается на две составляющие: ОЦК#2 и ОЦК#3. Рассчитанные составы фаз представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетный фазовый состав

Table 2

Calculated phase composition

Фаза	**Химический состав, ат. %**					**Объемная доля, %**
	Fe	**Co**	**Al**	**Ni**	**Mn**	
ОЦК#2	18,9	28,9	25,6	19,9	6,7	71,1
ОЦК#3	58,1	32,8	5,8	2,7	0,6	28,9

На рис. 2б представлены результаты фазового анализа образцов после термической обработки. В связи с перекрытием пиков фаз с близкими параметрами решетки на дифрактограммах всех образцов наблюдается наложение пиков двух ОЦК-фаз.

Микроструктура образцов (рис. 3) после отжига подтверждает наличие двух фаз. Светлые области соответствуют фазе ОЦК#3, состоящей в основном из железа и кобальта, а темные области – фазе ОЦК#2. Из результатов, полученных на сканирующем электронном микроскопе и фазового анализа можно сделать вывод, что структура материала состоит из двух ОЦК-фаз, что согласуется с результатами CALPHAD расчетов.

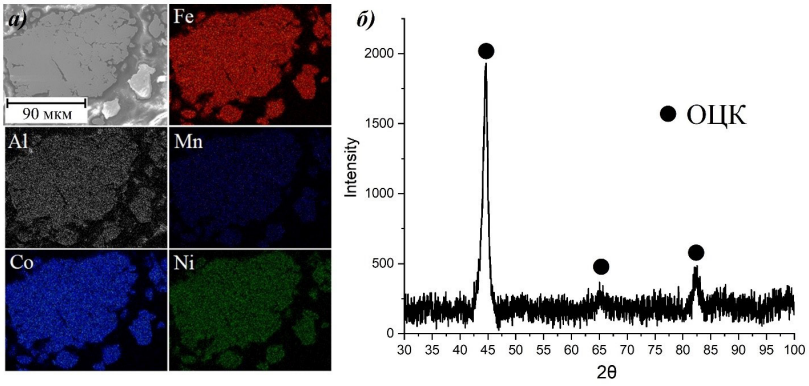


Рис. 1. Элементное распределение (а) и фазовый состав (б) $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$

Fig. 1. EDS map of element distribution (a) and phase composition (b) of $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$

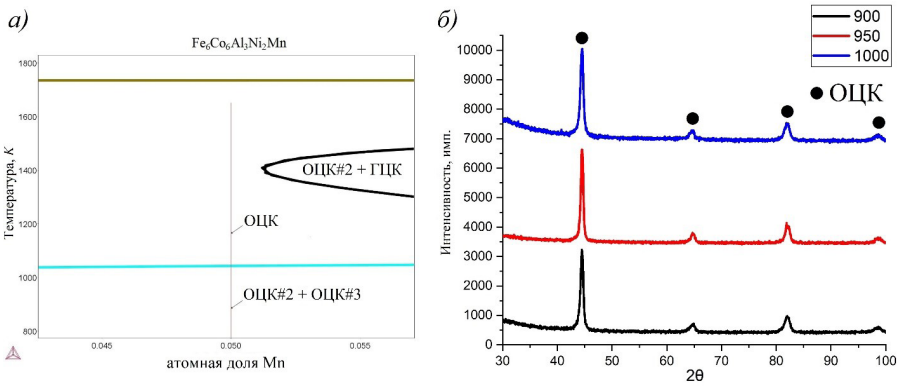


Рис. 2. Фазовая диаграмма (а) сплава $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ и рентгенограммы (б) образцов после отжига

Fig. 2. Phase diagram (a) of the $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ alloy and XRD patterns (b) of the samples after annealing

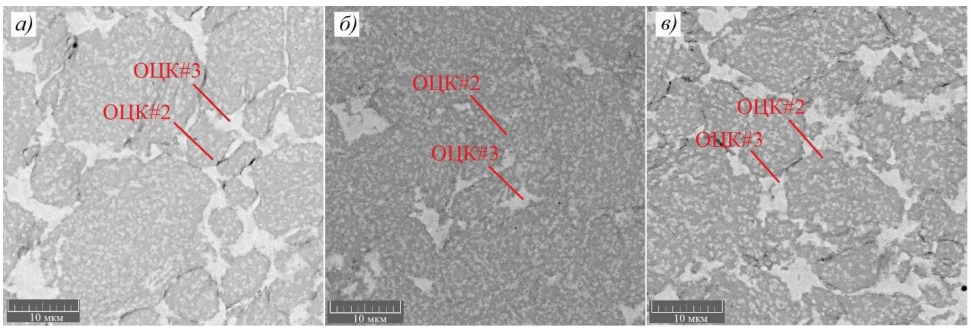


Рис. 3. Микроструктура образцов после отжига при 900 (а), 950 (б) и 1000°С (в)

Fig. 3. Microstructure of samples after annealing at 900 (a), 950 (b) and 1000°C (c)

Испытания механических свойств (рис. 4) показали высокие значения твердости и прочности на сжатие образцов. Твердость образцов после отжига при 900, 950 и 1000°С составила 718, 707 и 646 HV, а прочность на сжатие – 2677, 2334 и 2163 МПа. Выделение твердой фазы ОЦК#3 по границам приводит к низкой пластичности материала. Повышение температуры отжига приводит

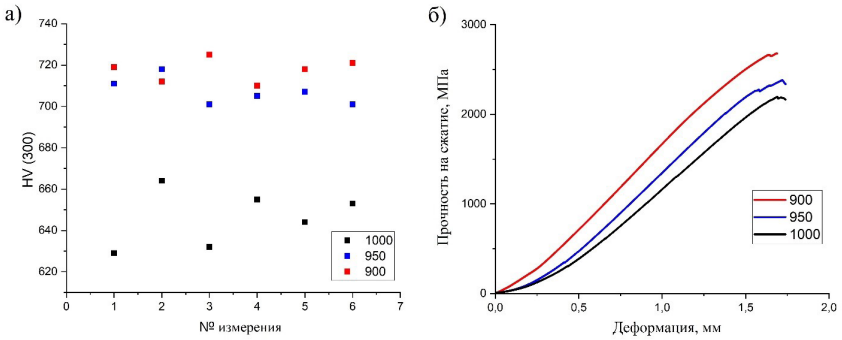


Рис. 4. Механические испытания образцов после отжига: микротвердость (а) и прочность на сжатие (б)
Fig. 4. Mechanical tests of samples after annealing: microhardness (a) and compressive strength (b)

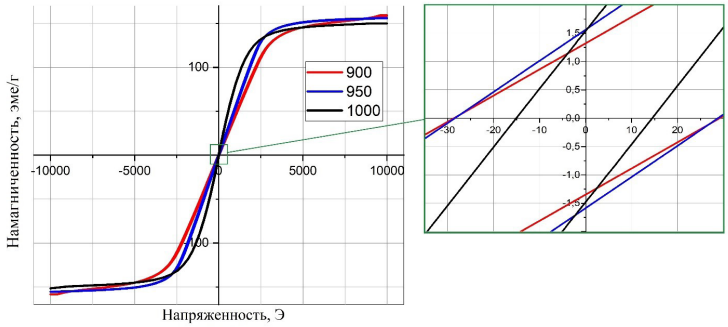


Рис. 5. Петли магнитного гистерезиса образцов
Fig. 5. Magnetic hysteresis loops of samples

к увеличению размера зерна фазы ОЦК#3 (рис. 3), что сопровождается падением механических свойств. Рост зерен фазы ОЦК#2 затруднен из-за ее сложного состава и влияния эффекта замедленной диффузии в ВЭС.

На рис. 5 показано исследование магнитных свойств образцов. Образец после отжига при температуре 1000°С показал наименьшую коэрцитивную силу (H_c = 14,8 Э), что, вероятно, связано с ростом доменов фазы ОЦК#3. Наибольшую намагниченность насыщения 159 эме/г показал образец после отжига при температуре 900°С.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что повышение температуры спекания до 1000°С резко снижает механические свойства и увеличивает магнитомягкие свойства.

Выводы

В данной работе получен новый ВЭС $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ методом МЛ. Изучены фазовый, гранулометрический состав и микроструктура порошка. Из легированных порошков получены образцы методом ИПС. Проанализировано влияние температуры отжига на механические и магнитные свойства полученных материалов. Исследованы фазовый состав и микроструктура спеченных образцов. Установлено, что наименьшая коэрцитивная сила ВЭС достигается при отжиге при 1000°С за счет роста α-фазы, состоящей в основном из железа и кобальта. По этой же причине образец, отожженный при самой высокой температуре, имеет наименьшую твердость и прочность на сжатие.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Lu T., He T., Andreoli A.F., Yao N., Wan B., Scudino S.** The origin of good mechanical and soft magnetic properties in a CoFeNi-based high-entropy alloy with hierarchical structure // Materials Characterization. 2024. Vol. 215. Art. no. 114237. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.114237

[2] **Li Z., Qi J., Li Z., Li H., Xu H., Bai G., Liu X., Zhang X.** Effect of grain and phase boundaries on soft magnetic properties of FeCoNiAlSi high-entropy alloys // Materials Letters. 2021. Vol. 297. Art. no. 129965. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129965

[3] **Song Z.B., Huang T.X., Jain A., Wang Y.G.** Indirect effect of Si on the ferromagnetic transformation of Mn in FeCoMnAlSi high-entropy soft magnetic alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2024. Vol. 1003. Art. no. 175575. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175575

[4] **An B.-L., Zhang P.-C., Cao Z.-R., Zhang C., Liu L.** Achieving excellent soft-magnetic properties in CoFeAlMnCr high entropy alloy by *in-situ* additive manufacturing // Scripta Materialia. 2024. Vol. 252. Art. no. 116282. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2024.116282

[5] **Wang W., Li H., Wei P., Zhang W., Chen J., Yuan S., Fan Y., Wei R., Zhang T., Wang T., Chen C., Li F.** A corrosion-resistant soft-magnetic high entropy alloy // Materials Letters. 2021. Vol. 304. Art. no. 130571. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130571

[6] **Mazeeva A.K., Kim A., Shamshurin A.I., Razumov N.G., Nazarov D.V., Borisov A.N., Popovich A.A.** Effect of heat treatment on structure and magnetic properties of $Ni_{36}Co_{37}Al_{27}$ alloy produced by laser powder bed fusion // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 938. Art. no. 168461. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168461

[7] **Zhao R.-F., Ren B., Zhang G.-P., Liu Z.-X., Cai B., Zhang J.** $CoCr_xCuFeMnNi$ high-entropy alloy powders with superior soft magnetic properties // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2019. Vol. 491. Art. no. 165574. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165574

[8] **Ozerskoi N.E., Razumov N.G., Silin A.O., Borisov E.V., Popovich A.A.** Mechanical properties of high-nitrogen steel produced via selective laser melting using mechanically alloyed and spheroidized powders // Powder Metallurgy and Functional Coatings. 2024. Vol. 18, No. 1. P. 81–94. DOI: 10.17073/1997-308X-2024-1-81-94

[9] **Moazzen P., Toroghinejad M.R., Zargar T., Cavaliere P.** Investigation of hardness, wear and magnetic properties of $NiCoCrFeZr_x$ HEA prepared through mechanical alloying and spark plasma sintering // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 892. Art. no. 161924. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161924

[10] **Popovich A.A., Razumov N.G.** Dissolution of alloying elements and phase formation in powder materials Fe-18Cr-8Ni-12Mn-xN during mechanical alloying // Advanced Materials Letters. 2014. Vol. 12, No. 5. P. 683–687. DOI: 10.5185/amlett.2014.6585

[11] **Chen C., Zhang H., Fan Y., Zhang W., Wei R., Wang T., Zhang T., Li F.** A novel ultrafine-grained high entropy alloy with excellent combination of mechanical and soft magnetic properties // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. Vol. 502. Art. no. 166513. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166513

[12] **Li P., Wang A., Liu C.T.** Composition dependence of structure, physical and mechanical properties of $FeCoNi(MnAl)_x$ high entropy alloys // Intermetallics. 2017. Vol. 87. P. 21–26. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.04.007

[13] **Munir K., Biesiekierski A., Wen C., Li Y.** Powder metallurgy in manufacturing of medical devices // Metallic Biomaterials Processing and Medical Device Manufacturing. 2020. P. 159–190. DOI: 10.1016/B978-0-08-102965-7.00005-9

[14] **Zhu S., Shittu J., Perron A., Nataraj C., Berry J., McKeown J.T., van de Walle A., Samanta A.** Probing phase stability in CrMoNbV using cluster expansion method, CALPHAD calculations and experiments // Acta Materialia. 2023. Vol. 255. Art. no. 119062. DOI: 10.1016/j.actamat.2023.119062

[15] **Zhu J., Lv M., Liu C., Tan X., Xu H.** Effect of neodymium and yttrium addition on microstructure and DC soft magnetic property of dual-phase $FeCoNi(CuAl)_{0.8}$ high-entropy alloy // Journal of Rare Earths. 2023. Vol. 41, No. 10. P. 1562–1567. DOI: 10.1016/j.jre.2022.06.005

[16] Махмутов Т.Ю., Разумов Н.Г., Попович А.А. Разработка способа синтеза однофазных высокоэнтропийных керамических материалов с высокой степенью химической однородности на примере эквиатомного высокоэнтропийного карбида (TiZrHfTaNb)C // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 109–119. DOI: 10.18721/JEST.27310

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КИМ Артем Эдуардович – *магистрант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: artem_7.kim@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2276-1359

МАЗЕЕВА Алина Константиновна – *доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: mazeevaalina@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8980-0869

РАЗУМОВ Николай Геннадьевич – *научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: n.razumov@onti.spbstu.ru

ВОЛОКИТИНА Екатерина Владимировна – *инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: volokitina1606@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5454-7733

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – *директор ИММиТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: popovicha@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5974-6654

REFERENCES

[1] **T. Lu, T. He, A.F. Andreoli, N. Yao, B. Wan, S. Scudino,** The origin of good mechanical and soft magnetic properties in a CoFeNi-based high-entropy alloy with hierarchical structure, Materials Characterization, 215 (2024) 114237. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.114237

[2] **Z. Li, J. Qi, Z. Li, H. Li, H. Xu, G. Bai, X. Liu, X. Zhang,** Effect of grain and phase boundaries on soft magnetic properties of FeCoNiAlSi high-entropy alloys, Materials Letters, 297 (2021) 129965. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129965

[3] **Z.B. Song, T.X. Huang, A. Jain, Y.G. Wang,** Indirect effect of Si on the ferromagnetic transformation of Mn in FeCoMnAlSi high-entropy soft magnetic alloy, Journal of Alloys and Compounds, 1003 (2024) 175575. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175575

[4] **B.-L. An, P.-C. Zhang, Z.-R. Cao, C. Zhang, L. Liu,** Achieving excellent soft-magnetic properties in CoFeAlMnCr high entropy alloy by *in-situ* additive manufacturing, Scripta Materialia, 252 (2024) 116282. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2024.116282

[5] **W. Wang, H. Li, P. Wei, W. Zhang, J. Chen, S. Yuan, Y. Fan, R. Wei, T. Zhang, T. Wang, C. Chen, F. Li,** A corrosion-resistant soft-magnetic high entropy alloy, Materials Letters, 304 (2021) 130571. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130571

[6] **A.K. Mazeeva, A. Kim, A.I. Shamshurin, N.G. Razumov, D.V. Nazarov, A.N. Borisov, A.A. Popovich,** Effect of heat treatment on structure and magnetic properties of $Ni_{36}Co_{37}Al_{27}$ alloy produced by laser powder bed fusion, Journal of Alloys and Compounds, 938 (2023) 168461. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168461

[7] **R.-F. Zhao, B. Ren, G.-P. Zhang, Z.-X. Liu, B. Cai, J. Zhang,** $CoCr_xCuFeMnNi$ high-entropy alloy powders with superior soft magnetic properties, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 491 (2019) 165574. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165574

[8] **N.E. Ozerskoi, N.G. Razumov, A.O. Silin, E.V. Borisov, A.A. Popovich**, Mechanical properties of high-nitrogen steel produced via selective laser melting using mechanically alloyed and spheroidized powders, Powder Metallurgy and Functional Coatings, 18 (1) (2024) 81–94. DOI: 10.17073/1997-308X-2024-1-81-94

[9] **P. Moazzen, M.R. Toroghinejad, T. Zargar, P. Cavaliere,** Investigation of hardness, wear and magnetic properties of $NiCoCrFeZr_x$ HEA prepared through mechanical alloying and spark plasma sintering, Journal of Alloys and Compounds, 892 (2022) 161924. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161924

[10] **A.A. Popovich, N.G. Razumov,** Dissolution of alloying elements and phase formation in powder materials Fe-18Cr-8Ni-12Mn-xN during mechanical alloying, Advanced Materials Letters, 5 (12) (2014) 683–687. DOI: 10.5185/amlett.2014.6585

[11] **C. Chen, H. Zhang, Y. Fan, W. Zhang, R. Wei, T. Wang, T. Zhang, F. Li,** A novel ultrafine-grained high entropy alloy with excellent combination of mechanical and soft magnetic properties, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 502 (2020) 166513. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166513

[12] **P. Li, A. Wang, C.T. Liu,** Composition dependence of structure, physical and mechanical properties of $FeCoNi(MnAl)_x$ high entropy alloys, Intermetallics, 87 (2017) 21–26. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.04.007

[13] **K. Munir, A. Biesiekierski, C. Wen, Y. Li,** Powder metallurgy in manufacturing of medical devices, Metallic Biomaterials Processing and Medical Device Manufacturing, (2020) 159–190. DOI: 10.1016/B978-0-08-102965-7.00005-9

[14] **S. Zhu, J. Shittu, A. Perron, C. Nataraj, J. Berry, J.T. McKeown, A. van de Walle, A. Samanta,** Probing phase stability in CrMoNbV using cluster expansion method, CALPHAD calculations and experiments, Acta Materialia, 255 (2023) 119062. DOI: 10.1016/j.actamat.2023.119062

[15] **J. Zhu, M. Lv, C. Liu, X. Tan, H. Xu,** Effect of neodymium and yttrium addition on microstructure and DC soft magnetic property of dual-phase $FeCoNi(CuAl)_{0.8}$ high-entropy alloy. Journal of Rare Earths, 41 (10) (2023) 1562–1567. DOI: 10.1016/j.jre.2022.06.005

[16] **T.Y. Makhmutov, N.G. Razumov, A.A. Popovich,** Development of synthesis method for singlephase high-entropy ceramic materials with a high degree of chemical homogeneity on the example of equiatomic high-entropy carbide (TiZrHfTaNb)C, Materials Science. Power Engineering, 27 (03) (2021) 109–119. DOI: 10.18721/JEST.27310

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Artem E. KIM – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: artem_7.kim@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2276-1359

Alina K. MAZEEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: mazeevaalina@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8980-0869

Nikolay G. RAZUMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: n.razumov@onti.spbstu.ru

Ekaterina V. VOLOKITINA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: volokitina1606@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5454-7733

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: popovicha@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5974-6654

Поступила: 29.10.2024; Одобрена: 24.12.2024; Принята: 25.12.2024.
Submitted: 29.10.2024; Approved: 24.12.2024; Accepted: 25.12.2024.

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 112–121.
Global Energy, 2025, 31 (1); 112–121.

Научная статья
УДК 678
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31108

Б.С. Ермаков, О.В. Швецов ✉ *, С.Б. Ермаков*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ shvec_off@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБУСТРОЙСТВЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АРКТИЧЕСКОГО ПОЯСА

Аннотация. Постепенное смещение нефтегазодобывающих предприятий в северо-восточные регионы страны, отличающиеся крайне низкими температурами, повышенными уровнями влажности и сейсмичности, требует дополнительного анализа возможности применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в строительных конструкциях, приборах и аппаратах, используемых при обустройстве месторождений. Обычно используемые в условиях статического нагружения материалы могут при возникновении сейсмических воздействий испытывать дополнительные динамические нагрузки. В работе приведены результаты исследования влияния внешних воздействий среды этого региона на три наиболее распространенных ПКМ на основе полибутилентерефталата, полиамида и поликарбоната. Проведены испытания ударной вязкости ПКМ в диапазоне температур от +20 до –60°С и после интенсивного водопоглощения.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, экстремально низкие климатические температуры, длительное захолаживание образцов, водопоглощение, ударная вязкость.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов» (FSEG-2024-0009).

Для цитирования:

Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б. Особенности применения полимерных композиционных материалов при обустройстве нефтегазовых месторождений Арктического пояса // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 112–121. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31108

© Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31108

B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov ✉ *, S.B. Ermakov*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ shvec_off@mail.ru

FEATURES OF USING POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN THE DEVELOPMENT OF OIL AND GAS FIELDS IN THE ARCTIC BELT

Abstract. The gradual shift of oil and gas production enterprises to the north-eastern regions of the country, characterized by extremely low temperatures, high humidity and seismicity, requires additional analysis of the possibility of using polymer composite materials (PCM) in building structures, devices and apparatus used in field development. Materials, usually used in conditions of static loading, can experience additional dynamic loads in case of seismic effects. In this work, the results of the research of the influence of external environmental impacts in this region on three most common PCMs based on polybutylene terephthalate, polyamide and polycarbonate are presented. Tests of impact toughness of PCMs in the temperature range from +20 to –60°C and after intensive water absorption were carried out.

Keywords: polymer composite materials, extremely low climatic temperatures, long-term cooling of samples, water absorption, impact toughness.

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Development of models for the degradation of service properties of metal and composite materials for construction in permafrost conditions" (FSEG-2024-0009).

Citation:

Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Ermakov S.B., Features of using polymer composite materials in the development of oil and gas fields in the Arctic belt, Global Energy, 31 (01) (2025) 112–121, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31108

Введение. Освоение новых перспективных месторождений нефти и газа в восточной части арктического региона РФ поставило принципиально новые задачи перед проектировщиками и строительными организациями, специализирующимися на вопросах обустройства новых месторождений и площадок добычи и переработки сырья. К задачам, которые необходимо решить при возведении новых объектов, относится крайне сложная логистика: практически полностью отсутствуют железные и автомобильные дороги, и единственным способом добраться до перспективных территорий в летние месяцы остается воздушный транспорт, а в зимние – проложенные по руслам рек автомобильные зимники. Все это значительно удорожает доставку материалов и оборудования на строительные площадки и делает крайне привлекательным процесс замещения металлических конструкций конструкциями из полимерных композитных материалов (ПКМ), плотность которых в пять-семь раз ниже плотности строительных сталей.

Наряду с этим северо-восточные регионы страны относятся к высокоактивным сейсмическим зонам. Так, по данным ряда авторов, ежегодно на территории Республики Саха (Якутия) происходит до пятисот подземных толчков различной интенсивности [1–3]. Поэтому при проектировании объектов, выборе материалов для обустройства месторождений приходится учитывать как основные геоклиматические требования к конструкциям (ГОСТ Р 57955–2017), так

© Rogalev N.D., Rogalev A.N., Kindra V.O., et al., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

и дополнительные требования и ограничения (СП 14.13330.2018), выдвигаемые к возведению зданий и сооружений, выбору технологий строительных работ, оценке применимости используемых материалов в условиях сейсмически опасных зон.

Значительная часть строительных конструкций в ходе эксплуатации испытывает только статические нагрузки. Согласно СП 16.13330.2017, к таким конструкциям относятся практически все основные строительные элементы – фермы, колонны, перекрытия, опорные плиты, обшивка зданий и сооружений и т.п. В зависимости от группы конструкций это могут быть либо растягивающие и изгибающие, либо сжимающие нагрузки. Отсутствие в строительных конструкциях динамического и циклического нагружения уже в ряде случаев позволило заменить традиционные металлические балки, трубы и листы на ПКМ-конструкции [4–9], однако такие решения были реализованы в центральных регионах страны, отличающихся умеренно холодным климатом и отсутствием повышенной сейсмичности. Поэтому автоматический перенос подобных решений о замене стальных конструкций на ПКМ-конструкции в условиях северо-востока страны без проведения дополнительных исследований поведения материалов при низких климатических температурах, повышенных влажности и сейсмичности невозможен и требует дополнительных исследований стойкости материалов в условиях динамического нагружения при температурах в диапазоне от +20 до –60°С и насыщения материалов влагой в летние месяцы.

Целью данной работы являлся анализ деградации механических свойств стеклонаполненных полимерных материалов, содержащих в качестве наполнителя 25–30% мелкоизмельченной стеклянной нити и применяемых в строительных конструкциях и контрольно-измерительной аппаратуре, которые используются на нефтегазовых месторождениях в условиях длительного воздействия низких климатических температур и повышенной влажности – то есть в условиях, типичных для северо-восточной части арктического региона РФ.

Методы и материалы

В качестве матричных материалов были выбраны следующие термопластичные полимеры.

Полибутилентерефталат (ПБТ) – полимер с высокой степенью кристалличности, относящийся к сложным насыщенным полиэфирам. В настоящее время этот стеклонаполненный полимерный материал широко используется как конструкционный пластик при изготовлении корпусов и несущих конструкций различного типа электромеханических и электронных устройств, применяется в измерительной технике и ряде строительных конструкций. В последние годы ПБТ успешно заменяет металлические материалы (цинк, бронзу, алюминий) в производстве деталей электротехнического и конструкционного назначения, приборостроении, электротехнике, электронике, используемых на нефтегазовых месторождениях.

Поликарбонат (ПК) – широко применяемый в промышленности термопласт, относящийся к сложным полиэфирам с малым уровнем кристалличности. Обладает высокой жесткостью в сочетании с высокой стойкостью к ударным воздействиям, в том числе при пониженной температуре, а также высокой химической устойчивостью к большинству неинертных веществ, что дает возможность применять его в агрессивных средах без изменения его химического состава и свойств. К таким веществам относятся минеральные кислоты даже высоких концентраций, соли, насыщенные углеводороды и спирты, включая метанол. Используется в строительных конструкциях, приборах и аппаратах, эксплуатируемых в условиях агрессивного воздействия внешних сред, в частности нефтяного флюида.

Полиамид (ПА) – материал на основе линейных синтетических высокомолекулярных соединений. Применяется в качестве конструкционного материала в строительных конструкциях, отличается повышенной жесткостью, прочностью, достаточным уровнем ударной вязкости, стойкостью к внешним воздействиям.

Для поведения исследований были использованы следующие материалы:

• Полибутилентерефталат стеклонаполненный марки Технотер А-СВ30-ОДИ (ТУ 2253-025-11517367-2002);
• Поликарбонат марки Carbomix (ТУ 2226-004-13619882-2009);
• Полиамид 610 литьевой (ГОСТ 10589-87).

Исследования влияния низких климатических температур на деградацию ПКМ были выполнены в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, регламентирующей подготовку и проведение механических испытаний: ГОСТ 26277-84, ГОСТ 14359-69, ГОСТ 4647-2015, ГОСТ 16782-92, ГОСТ 11262-80. Также проведены исследования водопоглощения ПКМ в соответствии с требованиями ГОСТ 4650-80 (метод А). Влияние низкотемпературных воздействий на свойства ПКМ были проведены в диапазоне температур от +20 до –60°С в исходном состоянии материалов и после их длительных низкотемпературных выдержек в камере холода при –60°С в течение 100, 250, 500 и 1000 часов. Влияние уровня водопоглощения на ударную вязкость ПКМ было проведено после насыщения ударных образцов ПКМ водой в течение 24, 48 и 96 часов по технологии, описанной в ГОСТ 4650-80. Торцевые части образцов были обработаны водоотталкивающим компаундом. Количество образцов на каждую точку измерения составляло 8 штук для испытаний в исходном состоянии и после пребывания в камере холода и 6 штук после выдержек в воде при температуре +23±2°С. Все испытания ударной вязкости были проведены при температурах +20, –40 и –60°С. Для проведения испытаний был использован маятниковый копер Zwick/Roell RKP 450, полностью соответствующий требованиям ГОСТ 10708-82.

Результаты

В табл. 1 показаны скорость и объем водопоглощения образцами ПКМ, определенные при их выдержке в воде при температуре +23±2°С в течение 12, 24, 48 и 96 часов. Показано, что максимальная скорость водопоглощения достигается за первые 24 часа испытаний, при увеличении времени выдержки скорость водопоглощения постепенно снижается. Так, если за первые 24 часа прирост массы ПА составил 2,9% от общей массы образца, то в дальнейшем за последующие 72 часа этот прирост оказался менее половины процента (3,26–2,91%). Таким же образом, хотя и с меньшим объемом водопоглощения, ведут себя ПБТ и ПК.

Таблица 1

Водопоглощение образцов стеклонаполненных ПКМ

Table 1

Water absorption of glass-filled PCM samples

ПКМ	Водопоглощение (%) за период (ч)				
	12	24	36	48	96
ПБТ	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07
ПК	0,21	0,24	0,26	0,27	0,28
ПА	1,93	2,61	2,96	3,17	3,26

Таким образом, был установлен факт интенсивного водопоглощения полиамидов, который может негативно сказаться во время их эксплуатации на открытом воздухе и в помещениях с повышенной влажностью. Однако основным показателем годности материала для использования в условиях зон повышенной сейсмичности является его сопротивляемость ударным нагрузкам. Для проверки данного показателя были выполнены испытания на ударную вязкость ПКМ.

В табл. 2 приведены средние значения результатов испытаний образцов после длительного пребывания в камере холода при температуре –60°С.

Таблица 2

Средние значения ударной вязкости образцов стеклонаполненных ПКМ в исходном состоянии и после длительных выдержек в камере холода

Table 2

Average values of impact toughness of glass-filled PCM samples in the initial state and after prolonged exposures in the cold chamber

ПКМ	$T_{исп}$, °С	Время выдержки в камере холода, ч				
		0	100	250	500	1000
		Средняя ударная вязкость $KCV_{сред}$, Дж/см²				
ПБТ	+20	6,9	6,2	5,7	4,6	–
	–40	1,7	1,4	1,1	0,8	–
	–60	1,3	1,1	0,8	–	–
ПК	+20	36,7	36,6	36,4	36,0	35,9
	–40	34,3	34,0	33,8	33,5	33,1
	–60	32,8	32,7	32,3	32,0	31,7
ПА	+20	16,2	16,0	15,8	15,4	14,9
	–40	15,6	15,3	15,0	14,4	13,9
	–60	14,4	14,1	13,7	13,2	12,7

Как следует из данных таблицы, наихудшие результаты показал ПБТ – материал, который максимально широко используется в качестве корпусов приборов различного назначения – от бытовых электровентиляторов до сложных и дорогостоящих приборов геофизических измерений, применяемых при контроле и слежении за технологическими процессами на площадках добычи, а также в ряде строительных конструкций. На рис. 1 приведены изломы образцов ПБТ после испытаний при +20 и –60°С. При комнатной температуре развитие трещины в образцах ПБТ происходит по полимерной матрице, практически не затрагивая наполнитель. При понижении температуры механизм изменяется, и трещина распространяется по полимерной матрице и волокнам стекла – на поверхности излома отчетливо видны осколки наполнителя, а вид излома при понижении температуры изменяется от вязкого и квазихрупкого к хрупкому.

Наилучшие результаты были получены при испытаниях ПК, ударная вязкость которого после 1000 часов захолаживания при –60°С снизилась на ~4% при температуре +20°С и на ~9% при испытаниях при –60°С, оставаясь во всем исследованном диапазоне температур на достаточно высоком уровне более 30 Дж/см². ПА показал среднее значение удара при комнатной температуре порядка 16 Дж/см² и 14 Дж/см² при –60°С, падение ударной вязкости после 1000 часов захолаживания составило ~20%. Вид изломов ПК и ПА – вязкий во всем диапазоне температур испытания, магистральная трещина развивается только по полимерной матрице, не затрагивая волокон стекла.

Влияние водопоглощения на ударную вязкость ПКМ приведено в табл. 3. Учитывая то, что ударные образцы значительно отличаются от образцов, предназначенных для испытаний на водопоглощение, в первую очередь меньшей площадью поверхности, контактирующей с водой, по сравнению со стандартными, изготавливаемыми по ГОСТ 4650-80, до проведения испытаний на ударную вязкость образцы дополнительно взвешивали, определяя фактический объем поглощенной жидкости. Как показали результаты взвешивания, расхождения в результатах для ПБТ и ПК не превысили 0,01 и 0,04%; после 96-часовой выдержки в воде в случае ПА разница оказалась

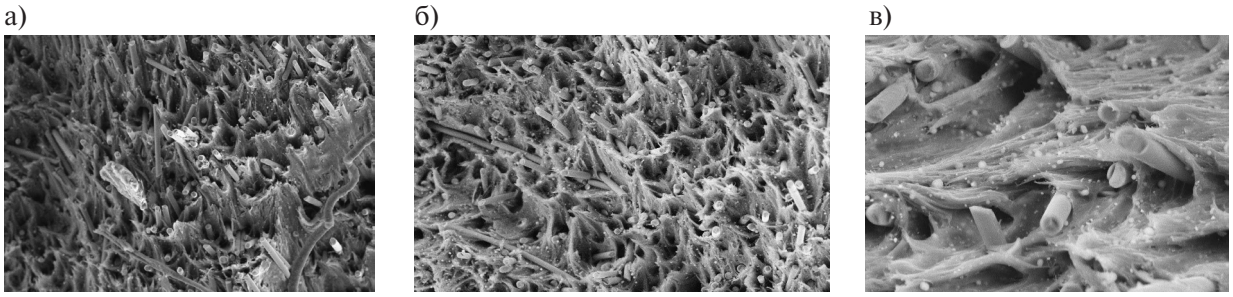


Рис. 1. Поверхности разрушения ПБТ после низкотемпературной выдержки в течение 1000 часов: а) разрушение по матрице (+20°С); б, в) – разрушение волокон стекла – осколки на поверхности излома (а, б – ×400; в – ×2000)

Fig. 1. Fracture surfaces of PBT after low-temperature curing during 1000 h: a) fracture on matrix (+20°C); b, c) fracture of glass fibers – splinters on the fracture surface (a, b – ×400; c – ×2000)

Таблица 3

Влияние водопоглощения на ударную вязкость стеклонаполненных ПКМ

Table 3

Effect of water absorption on impact toughness of glass-filled PCMs

ПКМ	$T_{исп}$, °С	Время выдержки в воде, ч				
		0	12	24	48	96
		Средняя ударная вязкость $KCV_{сред}$, Дж/см^2				
ПБТ	+20	6,9	6,7	6,4	6,3	6,1
	–60	1,3	1,1	0,9	0,6	0,4
ПК	+20	36,7	36,7	36,6	36,5	36,5
	–60	32,8	32,5	32,4	32,2	32,0
ПА	+20	16,2	16,0	15,7	15,5	15,3
	–60	14,4	11,3	7,5	3,1	–

достаточно значительной – объем поглощенной жидкости составил 2,89%, что меньше значений, полученных по ГОСТ 4650-80, на 0,37%.

Данные табл. 3 подтверждают первоначальный вывод о низком уровне ударной вязкости ПБТ во всем диапазоне климатических температур. Малая склонность материала к водопоглощению практически не изменяет уровень ударной вязкости в ходе испытаний при +20°С и снижает его вдвое при –60°С.

ПК оказался наименее чувствителен к воздействию влаги. Механизм разрушения образцов неизменен – вязкий с незначительно долей квазихрупкой составляющей. Волокна стекла по-прежнему не вовлечены в процесс разрушения, а магистральная трещина огибает их, развиваясь по полимерной матрице. ПА при комнатной температуре не чувствителен к объему поглощенной воды, механизм разрушения вязкий. При низких температурах происходит лавинообразное падение ударной вязкости. Так, при выдержке в воде в течение 96 часов ударная вязкость падает до нуля. Снижение ударной вязкости ПА при пониженных температурах сопровождается изменением механизма разрушения материала – от вязкого (рис. 2а) к квазихрупкому и хрупкому, причем причиной такого перехода являются частицы замерзшей воды, образующиеся вокруг волокон стекла (рис. 2б, в).

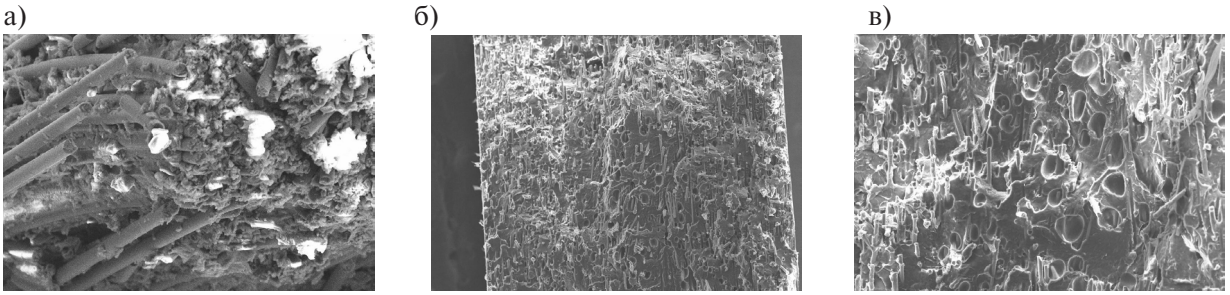


Рис. 2. Поверхности разрушения ПА: а) +20°С; б, в) –60°С – следы частиц льда вокруг волокон водопоглощения в течение 96 часов (а, в – ×500; б – ×150)

Fig. 2. PA fracture surfaces, a) +20°C; b, c) –60°C – traces of ice particles around the water absorption fibers within 96 hours (a, c – ×500; b – ×150)

Обсуждение

На основании проведенных исследований представляется возможным сделать несколько выводов. Испытаниями ударной вязкости ПКМ было показано, что в условиях сейсмоактивного северо-восточного региона РФ следует отказаться от широкого применения в корпусах ответственного оборудования и строительных конструкциях композитов на основе ПБТ, так как ударная вязкость этих ПКМ при пониженных температурах крайне мала, что может привести к хрупким разрушениям оборудования и сооружений при сейсмическом воздействии. ПКМ на основе ПА отличаются повышенным уровнем водопоглощения и развитием хрупкого разрушения при динамическом воздействии на материал при пониженных температурах.

Причина такого разрушения связана с особенностями водопоглощения ПКМ. Так, в работах [10–15] на примере ПКМ с термореактивной матрицей было показано, что поглощение воды ПКМ происходит по границам раздела матрица–наполнитель за счет капиллярного проникновения воды в тело композита вдоль поверхности волокон, а интенсивность процесса водопоглощения определяется уровнем смачивания полимерной матрицей стекловолокна. Полученные результаты позволяют утверждать, что такой же механизм накопления влаги существует и в термопластичных матрицах ПКМ.

Накопление влаги в теле композита на основе ПА оказывает воздействие на его структуру и механические свойства. В первую очередь это воздействие будет заметно при эксплуатации материалов при пониженных температурах или при их циклическом изменении вокруг 0°С. Диффузия молекул воды вдоль нитей наполнителя будет направлена к гидрофильным примесям матрицы, что приводит к образованию различного типа дефектов – трещин и пор в основе материала, к расслоениям и, как следствие, к нарушениям целостности, особо интенсивным при пониженных климатических температурах. Подобные повреждения структуры ПКМ неизбежно должны приводить к деградации их механических свойств, особенно в низкотемпературной области, что подтверждается данными табл. 3.

Выводы

Таким образом, ПКМ на основе ПА могут без ограничений применяться во влагозащищенных помещениях. При их использовании на открытом воздухе необходимо выполнить защиту поверхности конструкции водоотталкивающим компаундом и обеспечить контроль целостности защитного покрытия в ходе эксплуатации.

Анализ результатов ударной вязкости ПКМ на основе ПК позволяет без ограничений рекомендовать этот материал для использования в строительных конструкциях, корпусах приборов и оборудовании, используемом в условиях северо-востока страны, отличающегося крайне низкими климатическими температурами и повышенными уровнями сейсмичности и влажности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.** Сейсмотектоника Олекмо-становой сейсмической зоны (Южная Якутия) // Литосфера. 2005. № 2. С. 21–40.

[2] **Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М.** Геодинамические характеристики новейших структур Оленекского и Вилюйского районов Якутской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 11. С. 1499–1513. DOI: 10.15372/GiG2020107

[3] **Алексеева О.И., Балобаев В.Т.** Информационные модели криосферы Земли // Криосфера Земли. 2002. Т. 6, № 1. С. 62–71.

[4] **Спиридонов А.А., Фадеев А.М.** Системное развитие транспортной инфраструктуры в Арктике // АРКТИКА 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2022. Т. 4, № 12. С. 31–37. DOI: 10.51823/74670_2022_4_31

[5] **Валиев Ш.Н., Михалдыкин Е.С., Васильев А.И.** Испытания трубобетонных элементов с оболочкой из полимерных композиционных материалов как несущих конструкций малых мостовых сооружений // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2016. Т. 47, № 4. С. 88–98.

[6] **Малышкина А.В., Смирнов А.П.** Перспективы применения строительных композитных конструкций // Нефтяное хозяйство. 2019. № 12. С. 74–76. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-12-74-76

[7] **Габова М.А.** Применение композиционных материалов при добыче нефти и газа // Вестник университета. 2012. № 10. С. 88–92.

[8] **Туйсина Е.Б., Сулейманов А.М.** Моделирование работы полимерных композиционных материалов в напряженно-деформированном состоянии под воздействием агрессивных сред. Часть 2. Метод прогнозирования долговечности полимеркомпозитной арматуры // Известия КГАСУ. 2019. Т. 48, № 2. С. 255–262.

[9] **Московченко Д.В.** Биогеохимические особенности почв бассейна реки Мессояха (Тазовский район Ямало-Ненецкого автономного округа) // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Экология и природопользование. 2016. Т. 2, № 2. С. 8–21. DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-2-8-21

[10] **Корецкая Л., Александрова Т.** Влияние воды на свойства стеклопластиков // Полимерные трубы. 2011. № 1. С. 38–41.

[11] **Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К.** Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия АлтГУ. Физика. 2020. № 1 (111). С. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06

[12] **Al Rashid A., Koç M.** Creep and recovery behavior of continuous fiber-reinforced 3DP composites // Polymers. 2021. Vol. 10, No. 13. P. 1644. DOI: 10.3390/polym13101644

[13] **Waqar M., Memon A.M., Sabih M., Alhems L.M.** Composite pipelines: Analyzing defects and advancements in non-destructive testing techniques // Engineering Failure Analysis. 2024. No. 157. Article no. 107914. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107914

[14] **Францев М.Э., Кирейнов А.В.** Результаты сравнительных испытаний композиционных материалов судостроительного назначения на основе стеклянных и базальтовых волокон на полиэфирном связующем на водопоглощение // Транспортные системы. 2019. № 1. С. 41–48. DOI: 10.46960/62045_2019_1_41

[15] **Al-Darraji F., Sadique M., Čebašek T.M., Ganguli A., Yu Z., Hashim K.** A Systematic Review of the Geotechnical and Structural Behaviors of Fiber-Reinforced Polymer Composite Piles // Geosciences. 2023. No. 13. Article no. 78. DOI: 10.3390/geosciences13030078

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМАКОВ Борис Сергеевич – *главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: ermakov55@bk.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0932-2408

ШВЕЦОВ Олег Викторович – *инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: shvec_off@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9368-4074

ЕРМАКОВ Сергей Борисович – *директор НИОЦ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4243-0984

REFERENCES

[1] **V.S. Imaev, L.P. Imaeva, B.M. Kozmin,** Seismotectonics of Olekmo-stanovaya seismic zone (South Yakutia), Lithosphere, 2 (2005) 21–40

[2] **L.P. Imaeva, V.S. Imaev, B.M. Koz'min,** Geodynamic characteristics of neotectonic structures in the Olenek and Vilyui areas of the Yakutian kimberlite province, Russian Geology and Geophysics, 61 (11) (2020) 1499–1513. DOI: 10.15372/GiG2020107

[3] **O.I. Alekseeva, V.T. Balobaev,** Informacionnye modeli kriosfery Zemli [Information models of the Earth's cryosphere], Earth's Cryosphere, 6 (1) (2002) 62–71.

[4] **A.A. Spiridonov, A.M. Fadeev,** Systematic development of transport infrastructure in the Arctic, ARCTIC 2035: current issues, problems, solutions, 4 (12) (2022) 31–37. DOI: 10.51823/74670_2022_4_31

[5] **Sh.N. Valiev, E.S. Mikhaldykin, A.I. Vasiliev,** Test of concrete filling fiber reinforcement plastic tube, as load-bearing structures of small bridges, Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta (MADI), 4 (47) (2016) 88–98.

[6] **A.V. Malyshkina, A.P. Smirnov,** Prospects for the use of building composite structures, Oil Industry Journal, 12 (2019) 74–76. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-12-74-76

[7] **M.A. Gabova,** The usage of composite materials in oil and gas extraction, Vestnik universiteta, 10 (2012) 88–92.

[8] **E.B. Tuisina, A.M. Suleimanov,** Simulation of polymer composite materials in the stress-strain state under the influence of aggressive media. Part 2. Method for predicting the durability of fiber reinforced polymer, News of the Kazan State University of Architecture and Engineering, 2 (48) (2019) 255–262.

[9] **D.V. Moskovchenko,** Biogeochemical properties of the soils of Messoyakha river basin (Tazovsky district of Yamal-Nenets autonomous area), Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology, 2 (2) (2016) 8–21. DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-2-8-21

[10] **L. Koretskaya, T. Aleksandrova,** Vliianie vody na svoistva stekloplastikov [The influence of water on the properties of fiberglass], Plastic Pipes, 1 (2011) 38–41.

[11] **O.V. Startsev, M.P. Lebedev, A.K. Kychkin,** Aging of Polymer Composites in Extremely Cold Climates, Izvestiya of Altai State University, 1(111) (2020) 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06

[12] **A. Al Rashid, M. Koç,** Creep and recovery behavior of continuous fiber-reinforced 3DP composites, Polymers, 13(10) (2021) 1644. DOI: 10.3390/polym13101644

[13] **M. Waqar, A.M. Memon, M. Sabih, L.M. Alhems,** Composite pipelines: Analyzing defects and advancements in non-destructive testing techniques, Engineering Failure Analysis, 157 (2024) 107914. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107914

[14] **M.E. Frantsev, A.V. Kireinov,** Rezul'taty sravnitel'nykh ispytanii kompozitsionnykh materialov sudostroitel'nogo naznacheniia na osnove stekliannykh i bazal'tovykh volokon na poliefirnom sviazuiushchem na vodopogloshchenie [Results of comparative tests of composite materials for shipbuilding purposes based on glass and basalt fibers on a polyester binder for water absorption], Transportnye sistemy [Transport systems], 1 (2019) 41–48. DOI: 10.46960/62045_2019_1_41

[15] **F. Al-Darraji, M. Sadique, T.M. Čebašek, A. Ganguli, Z. Yu, K. Hashim,** A Systematic Review of the Geotechnical and Structural Behaviors of Fiber-Reinforced Polymer Composite Piles, Geosciences, 13(3) (2023) 78. DOI: 10.3390/geosciences13030078

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Boris S. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ermakov55@bk.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0932-2408

Oleg V. SHVETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: shvec_off@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9368-4074

Sergey B. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4243-0984

Поступила: 12.12.2024; Одобрена: 28.12.2024; Принята: 28.12.2024.
Submitted: 12.12.2024; Approved: 28.12.2024; Accepted: 28.12.2024.

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 122–135.
Global Energy, 2025, 31 (1); 122–135.

Научная статья
УДК 621.315.61
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31109

А.А. Павлов[1] ✉ , *М.Э. Борисова*[1],
А.М. Камалов[2], *А.Л. Диденко*[2]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;

[2] Филиал ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“» – Институт высокомолекулярных соединений, Санкт-Петербург, Россия

✉ pavlov_aa@spbstu.ru

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИИМИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Аннотация. В данной работе исследованы электрофизические свойства термопластичных и термореактивных полиимидов (ПИ): электропроводность, кратковременная электрическая прочность, динамические механические характеристики. С целью повышения кратковременной электрической прочности были синтезированы композиционные материалы на основе полиимидных матриц. Определены температуры стеклования T_g ПИ методом динамического механического анализа. Показано, что с увеличением T_g наблюдается рост модуля упругости и снижение тангенса угла механических потерь. В интервале температур ниже температуры стеклования проводимость ПИ не зависит от гибкости цепи макромолекул. Определена кратковременная электрическая прочность ПИ при переменном напряжении промышленной частоты (50 Гц). Из полученных данных следует, что величина $E_{пр}$ отечественной пленки Р-СОД выше $E_{пр}$ пленки А-мФ (ULTEM) на 24%. При этом введение наполнителей (Аэросил, фторопласт) в Р-СОД и ПМ-ДАДФЭ не привело к увеличению кратковременной электрической прочности.

Ключевые слова: полиимид, электрическая прочность, проводимость, динамический механический анализ.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания (тема №124013-000726-6 «Полимерные и композиционные материалы для перспективных технологий»).

Для цитирования:

Павлов А.А., Борисова М.Э., Камалов А.М., Диденко А.Л. Электрофизические свойства полиимидных материалов и композитов на их основе // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 122–135. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31109

© Павлов А.А., Борисова М.Э., Камалов А.М., Диденко А.Л., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31109

A.A. Pavlov[1] ✉ , *M.E. Borisova*[1],
A.M. Kamalov[2], *A.L. Didenko*[2]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;
[2] Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute Named by B.P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute" – Institute of Macromolecular Compounds, St. Petersburg, Russia

✉ pavlov_aa@spbstu.ru

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF POLYIMIDE MATERIALS AND POLYIMIDE-BASED COMPOSITES

Abstract. This work investigates the electrophysical properties of thermoplastic and thermosetting polyimides (PI): electrical conductivity, dielectric strength, dynamic mechanical characteristics. In order to increase the dielectric strength, composite materials based on polyimide matrices are synthesized. The glass transition temperatures T_g for PI are determined by the dynamic mechanical analysis. With an increase in T_g, an increase in the modulus of elasticity and a decrease in the tangent of the mechanical losses are observed. In the temperature range below the glass transition temperature, the conductivity of PI does not depend on the flexibility of the macromolecule chain. The dielectric strength of PI at alternating voltage of industrial frequency (50 Hz) is determined. Compared to the Ultem film, the breakdown voltage of the domestic R-BAPS film is higher by 24%. At the same time, the introduction of fillers (Aerosil, fluoroplast) into R-BAPS and PMDA-ODA did not lead to an increase in the dielectric strength.

Keywords: polyimide, dielectric strength, conductivity, dynamic mechanical analysis.

Acknowledgements: The work was carried out within the state assignment No 124013000726-6.

Citation:

Pavlov A.A., Borisova M.E., Kamalov A.M., Didenko A.L., Electrophysical properties of polyimide materials and polyimide-based composites, Global Energy, 31 (01) (2025) 122–135, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31109

Введение. Развитие электротехнической промышленности требует изучения и внедрения новых изоляционных материалов. Для определения возможностей применения нового материала необходимо исследовать его электрофизические свойства: удельную проводимость, электрическую и механическую прочность. Сегодня существенное внимание уделяется полиимидным материалам и композиционным структурам на их основе.

Настоящая работа посвящена изучению электрических свойств термопластичных и термореактивных полиимидов (ПИ). ПИ обладают высокими механическими характеристиками, низкой электрической проводимостью, стойкостью к агрессивным средам и повышенным температурам, что позволяет применять их в составе изоляции электрических машин, печатных плат и в качестве защитных покрытий. К недостаткам ПИ можно отнести высокую стоимость, которая может быть снижена при переходе к термопластичным ПИ.

В работе исследуются свойства термопластичных ПИ: импортного А-мФ и отечественного Р-СОД с целью оценки возможности замещения. Для повышения электрической прочности ПИ были получены композиционные материалы на основе ПИ с органическими и неорганическими наполнителями.

© Pavlov A.A., Borisova M.E., Kamalov A.M., Didenko A.L., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

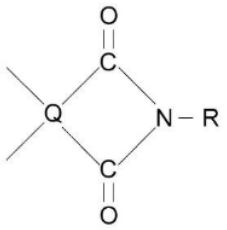


Рис. 1. Общая химическая формула ПИ
Fig. 1. PI general chemical formula

Обзор литературы

Полиимиды – это класс термостойких полимеров, обладающих высокими механическими и диэлектрическими характеристиками в широком интервале температур [1, 2].

На рис. 1 приведена общая химическая формула для ПИ.

В качестве термостойкой изоляции в России и за рубежом традиционно применяются изделия из полипиромеллитида (ПМ). К недостаткам термореактивного ПМ можно отнести высокую стоимость, слабую адгезию к металлам, высокую гигроскопичность.

Для создания термопластичных ПИ в цепь полимера вводят «шарнирные» атомы (O, N, S и др.) или функциональные группы [3]. Таким образом можно увеличить гибкость полимерной цепи и существенно понизить температуру стеклования T_g ПИ [4–6]. Несмотря на то, что первые попытки внедрения термопластичных ПИ в качестве электрической изоляции упоминаются в конце 1990-х годов [7], свое применение они находят в настоящее время. В работе [8] проведен комплекс опытов, который показывает, что полиэфиримид А-мФ (ULTEM) соответствует требованиям, предъявляемым к межвитковой изоляции силовых трансформаторов.

В последнее время в зарубежной литературе особое внимание уделяется созданию композиционных полимерных материалов с повышенным значением $E_{пр}$ [9–12]. В работе [13] описывается влияние наполнителя на электрическую прочность материала. Было высказано предположение, что несоответствие физических и химических свойств между наполнителем и полимерной матрицей может привести к накоплению заряда на границе раздела матрица–наполнитель. В результате носители зарядов под действием приложенного электрического поля мигрируют в эту область и захватываются на локальные энергетические уровни – «ловушки», что задерживает формирование проводящего канала. Электрическое поле деполяризации с учетом захваченных на границе раздела зарядов понижает величину среднего поля E в диэлектрике и приводит к повышению электрической прочности. Введение наполнителя ZnO в PVDF повысило электрическую прочность почти на 50% по сравнению с чистым полимером.

Подобные исследования проведены для ПИ пленок. Авторы статьи [14] ввели флуорен в молекулярную цепь ПИ, затем в матрицу были введены нанокластеры алюминия. В работе установлено, что значение $E_{пр}$ композитной пленки на основе ПИ (MPI/1,0 об.% AOC) увеличилось в 1,55 раза по сравнению с исходной пленкой ПИ.

В работе [15] нанопластины из нитрида графита (CNN) подвергались ультразвуковому отслаиванию и покрывались полидопамином для получения модифицированных нанопластин (DCNN). Были получены ПИ композитные пленки с различным содержанием CNN и DCNN. Благодаря наличию большого количества гидроксильных групп в составе полидопамина, в композитах PI/DCNNS была достигнута хорошая совместимость наполнителя с полимером и равномерная дисперсия наполнителя. Увеличение электрической прочности композита ПИ с 0,5 мас.% DCNNS составило 67,6% по сравнению с чистым ПИ, для PI/CNNS с тем же содержанием наполнителя – 14,5%.

Целью работы является определение электрофизических свойств термопластичных и термореактивных ПИ, что позволит уточнить область применения этих материалов, оценить возможность импортозамещения. На основе матриц ПИ синтезированы композиционные материалы с целью увеличения электрической прочности.

Полученные данные предоставляют дополнительную информацию производителям материалов (ИВС, НИЦ «Курчатовский институт»), позволяющую оптимизировать технологию производства ПИ, улучшить их характеристики.

Методика измерений

Объект исследования

Пленки ПИ были изготовлены в филиале ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“» – Институте высокомолекулярных соединений. Растворы полиамидкислоты (ПАК) получались поликонденсацией смеси диангидрида и диамина в растворителе ДМАА (диметилацетамид). ПИ пленки толщиной ~60 мкм изготовлены поливом на стекло 10–20% раствора ПАК.

В дальнейшем образцы подвергались сушке при 60°С в течение 24 ч. Термическую циклизацию пленок ПАК проводили на стекле при температурах 100, 200, 300°С в течение 1 ч и в течение 15 мин при 360°С.

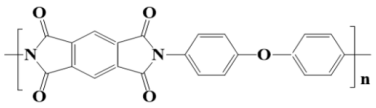
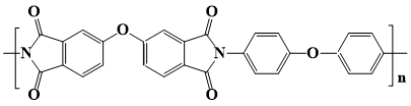
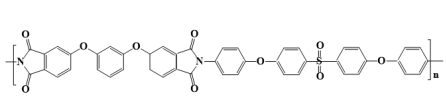
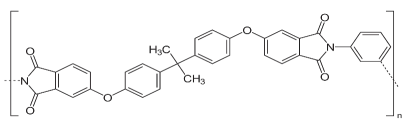
В табл. 1 приведены химические формулы и параметры исследуемых ПИ. А-мФ, Р-СОД и ДФО-ДАДФЭ – термопластичные полимеры, ПМ-ДАДФЭ – термореактивный. Сегмент Куна – количественный критерий гибкости макромолекул; длина молекулярной цепи, которая может считаться свободно-сочлененной.

Таблица 1

Сведения об исследуемых материалах

Table 1

Properties of the studied materials

ПИ	Формула	T_g, °С	Сегмент Куна [16], Å
ПМ-ДАДФЭ (ПМ-1)		380	72
ДФО-ДАДФЭ		250	38
Р-СОД		220	20
Ам-Ф (ULTEM)		217	20

На основе матриц Р-СОД и ПМ-ДАДФЭ были синтезированы композиционные материалы с низким содержанием наполнителя (1 мас.%). В качестве наполнителей были выбраны Аэросил и фторопласт.

Аэросил Т30 – пирогенный диоксид кремния (SiO_2), доступный нетоксичный наполнитель, применяющийся для упрочнения полимеров. Фторопласт Ф4МД – политетрафторэтилен (ПТФЭ), полимер, обладающий стойкостью к высоким температурам и химическим средам. ПТФЭ является неполярным материалом, применяется в роли наполнителя для снижения относительной диэлектрической проницаемости полярных матриц.

Динамический механический анализ

Метод динамического механического анализа (ДМА) применяется для получения данных о вязкоупругих характеристиках материалов в широком температурном диапазоне: о модуле упругости E', вязкости E'' и о тангенсе угла механических потерь. ДМА проводился с применением прибора DMA 242C (NETZSCH, Германия) при деформации растяжения со скоростью нагрева 5°C/мин. Частота приложения динамической нагрузки составляла 1 Гц, амплитуда деформации 15 мкм; статическая сила 0,1 Н, динамическая сила 2 Н, измерения проводились в воздушной атмосфере.

Приложенное механическое напряжение описывается следующим выражением:

$$\sigma(t) = \sigma_{max} \sin \omega t, \tag{1}$$

где σ_{max} – амплитуда механического напряжения, а ω – угловая частота механических осцилляций.

Приложение механического напряжения приводит к деформации ε_m, определяющейся следующим выражением:

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta l}{l_0}, \tag{2}$$

где Δl – удлинение, а l_0 – начальная длина образца.

Модуль упругости при этом рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_m}. \tag{3}$$

Измерение электропроводности полиимидов

Для измерения удельного сопротивления плоских диэлектрических образцов следует применять трехэлектродную систему (ГОСТ 6433.2-71), но, согласно ОСТ 6-05-423-76, для полимерных пленок толщиной менее 100 мкм допускается использовать двухэлектродную схему.

Установка состоит из сушильного шкафа SNOL, пикоамперметра МНИПИ А2-4 с встроенным источником напряжения и измерительной двухэлектродной ячейки. Измерения токов проводились в изотермическом режиме при температурах от 25 до 200°C. Погрешность измерения температуры составляла ±1°C.

Значения сквозного тока фиксировались после выдержки образца под напряжением в течение 4 ч.

Удельная проводимость образца ПИ рассчитывается по следующей формуле:

$$\gamma = \frac{l \cdot I}{S \cdot U}, \tag{4}$$

где l – толщина образца, I – ток, U – разность потенциалов на электродах, S – площадь электрода.

Перед измерениями образцы прогревались до 200°C в течение 60 мин в замкнутом состоянии. На образцы накладывались алюминиевые фольговые электроды диаметром 20 мм. Опорное напряжение составляло 10 В. Погрешность измерения тока составляет до 0,5%.

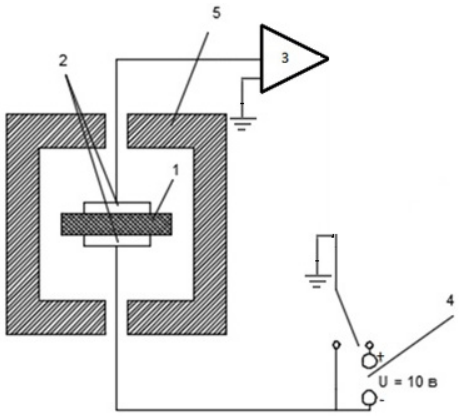


Рис. 2. Схема установки: 1 – исследуемый образец; 2 – электродная ячейка; 3 – пикоамперметр А2-4; 4 – источник напряжения; 5 – сушильный шкаф

Fig. 2. Current measuring installation: 1 – Test sample; 2 – Electrode cell; 3 – A2-4 picoammeter; 4 – Voltage source; 5 – Thermal cabinet

Пробой полиимидов

Пробой образцов ПИ проводился на высоковольтном испытательном аппарате СКАТ-70.

Электрическая прочность определялась при подъеме переменного напряжения $f = 50$ Гц со скоростью 0,5 кВ/с до пробоя диэлектрика. Испытания проводились при комнатной температуре. Размер образцов лабораторного производства составлял 9×9 см. С учетом этого пробой проводился в электродной системе плоскость–шар, диаметр шара составлял 4 мм. Для устранения краевых частичных разрядов образцы помещались в трансформаторное масло.

Пробой диэлектрика фиксировался по падению напряжения на образце. Погрешность измерения напряжения составляет до 2,6%.

На рис. 3 приведена фотография места пробоя пленки Р-СОД, полученная при помощи оптического микроскопа.

В пределах контура канала пробоя отсутствуют следы скользящих разрядов по поверхности. Можно полагать, что имел место электрический пробой. Для подтверждения этого положения проводились испытания электрической прочности пленок ПИ на постоянном напряжении в широком интервале температур [17]. Было установлено, что тепловая форма пробоя имеет место при температурах выше 200°С.

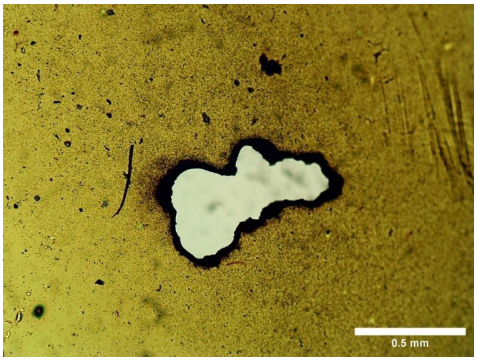


Рис. 3. Фотография места пробоя пленки Р-СОД

Fig. 3. Photo of the breakdown site of the R-BAPS film

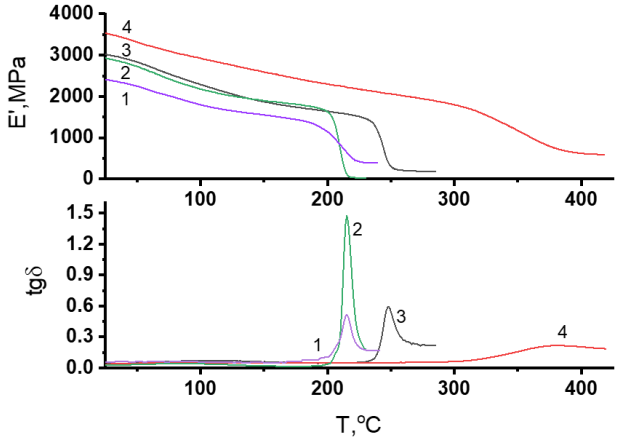


Рис. 4. Зависимости динамического модуля упругости и механических потерь пленок ПИ от температуры: 1 – А-мФ, 2 – Р-СОД, 3 – ДФО-ДАДФЭ, 4 – ПМ-ДАДФЭ

Fig. 4. Thermal dependences of the dynamic modulus of elasticity and mechanical losses of PI films: 1 – ULTEM, 2 – R-BAPS, 3 – ODPA-ODA, 4 – PMDA-ODA

Экспериментальные данные

Динамический механический анализ полиимидов

Для оценки температур релаксационных переходов ПИ пленок А-мФ, Р-СОД, ДФО-ДАДФЭ и ПМ-ДАДФЭ были измерены температурные зависимости динамического модуля упругости (E') и тангенса угла механических потерь (tgδ) (рис. 4).

В области исследуемых температур кривые tgδ(T) имеют два релаксационных процесса. Высокотемпературный релаксационный максимум на кривых tgδ(T) отражает размораживание сегментальной подвижности ПИ макромолекулы и определяется температурой стеклования (табл. 2). С увеличением жесткости ПИ высокотемпературный пик смещается в область более высоких температур, что связано с ограниченной подвижностью сегментов макромолекул. Низкотемпературный широкий максимум в области 100°С связан с релаксационном переходом, обусловленным некооперативным движением диаминного и диангидридного фрагментов цепи в структуре рассматриваемых ПИ. С увеличением жесткости макромолекул ПИ величина тангенса угла механических потерь в области температуры стеклования существенно уменьшается. Модули упругости E' при 25°С и температуры стеклования T_g ПИ пленок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики ПИ, полученные методом ДМА

Table 2

PI properties obtained by DMA

ПИ	Модуль упругости, GPa	Температура стеклования, °С
А-мФ	2,5	215
Р-СОД	2,9	215
ДФО-ДАДФЭ	3,0	248
ПМ-ДАДФЭ	3,5	380

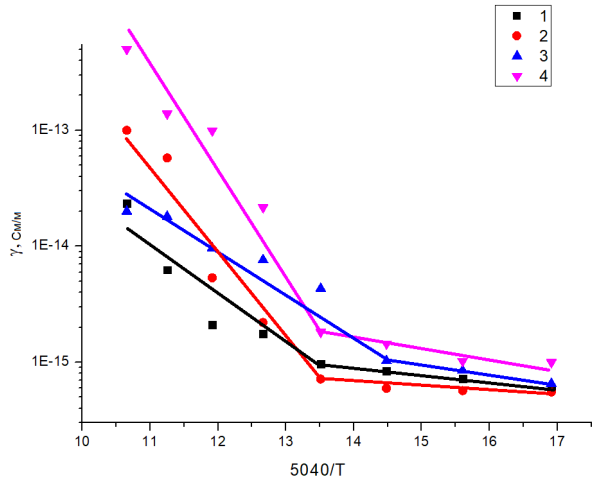


Рис. 5. Зависимости удельной проводимости полиимидов от температуры:
1 – А-мФ, 2 – ПМ-ДАДФЭ, 3 – ДФО-ДАДФЭ, 4 – Р-СОД

Fig. 5. Temperature dependences of the conductivity of polyimides:
1 – ULTEM, 2 – PMDA-ODA, 3 – ODPA-ODA, 4 – R-BAPS

Удельная проводимость полиимидов

На рис. 5 приведены зависимости удельной проводимости полиимидов от температуры.

Из графика следует, что температурные зависимости проводимости ПИ имеют криволинейный характер в диапазоне температур от 25 до 200°С, что отличается от литературных данных для полимеров. Для количественной оценки зависимости $\gamma = f(T)$ кривые были представлены в виде совокупности двух прямолинейных отрезков с изломом в области 100°С. По наклону этих отрезков были определены энергии активации проводимости W (табл. 3).

Таблица 3

Энергии активации ПИ

Table 3

Activation energies of PI

Материал	W_1, эВ	W_2, эВ
ПМ-ДАДФЭ	0,16	0,67
Р-СОД	0,19	0,83
ДФО-ДАДФЭ	0,25	0,60
Ам-Ф	0,15	0,39

В области температур ниже 100°С значения W_1 составляют 0,15–0,25 эВ. Выше 100°С интенсивность активационных процессов возрастает, значения W_2 составляют 0,39–0,83 эВ.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что зависимость проводимости ПИ от жесткости макромолекул ПИ материала в области температур ниже T_g не обнаружена.

Кратковременная электрическая прочность

Зависимости вероятности пробоя от $E_{пр}$ для чистых ПИ приведены на рис. 6. Полученные значения $E_{пр}$ для исследуемой выборки образцов описываются распределением Вейбулла.

В табл. 4 приведены значения $E_{пр}$, соответствующие вероятности 0,63, и среднеквадратичные отклонения. Из таблицы и рисунка следует, что значения электрической прочности $E_{пр}$ для

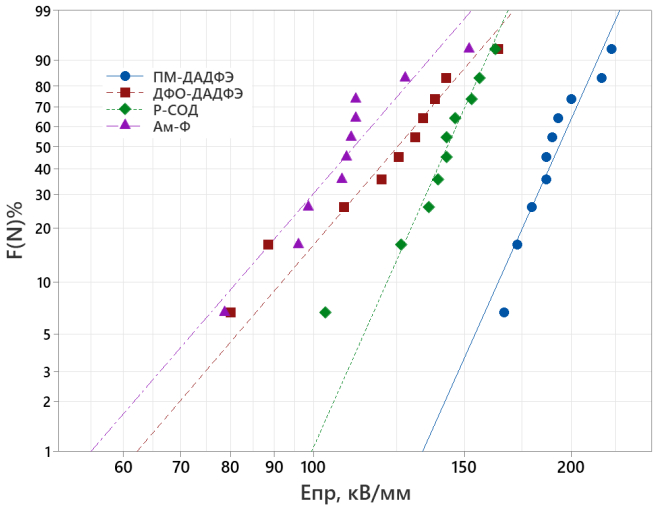


Рис. 6. Распределение электрической прочности $E_{пр}$ в координатах Вейбулла для ПИ пленок
Fig. 6. Weibull distribution of breakdown strength for PI films

исходных ПИ лежат в диапазоне от 98 до 220 кВ/мм. Наиболее высокое значение $E_{пр}$ наблюдается у пленок ПМ-ДАДФЭ.

На электрическую прочность ПИ влияет химическая структура молекулы, в том числе длина свободно-сочлененной цепи. В работе [18] было показано, что одним из факторов, влияющих на $E_{пр}$ ПИ, является наличие группы SO_2 в качестве «шарнира» в цепи молекулы ПИ. Из полученных нами данных (табл. 4) следует, что пленки Р-СОД обладают более высоким значением $E_{пр}$ по сравнению с А-мФ и ДФО-ДАДФЭ. При этом температура стеклования, определяющая гибкость полимерной цепи, у пленок ДФО-ДАДФЭ (248°С) выше, чем у пленок Р-СОД и А-мФ (215°С). Можно полагать, что наличие группы SO_2 в Р-СОД является существенным фактором, влияющим на электрическую прочность ПИ.

Таблица 4

Электрическая прочность ПИ пленок

Table 4

Breakdown strength of PI films

ПИ	*E*, кВ/мм
А-мФ (ULTEM)	119±21
Р-СОД	148±15
ДФО-ДАДФЭ	133±24
ПМ-ДАДФЭ (ПМ-1)	200±20

Введение 1% мас. Аэросила практически не оказывает влияния на величину $E_{пр}$, в то время как введение 1% мас. фторопласта снижает величину $E_{пр}$ на 24% по сравнению с исходным материалом.

Введение наполнителей (1% мас. Аэросила или фторопласта) снижает кратковременную электрическую прочность ПМ-ДАДФЭ.

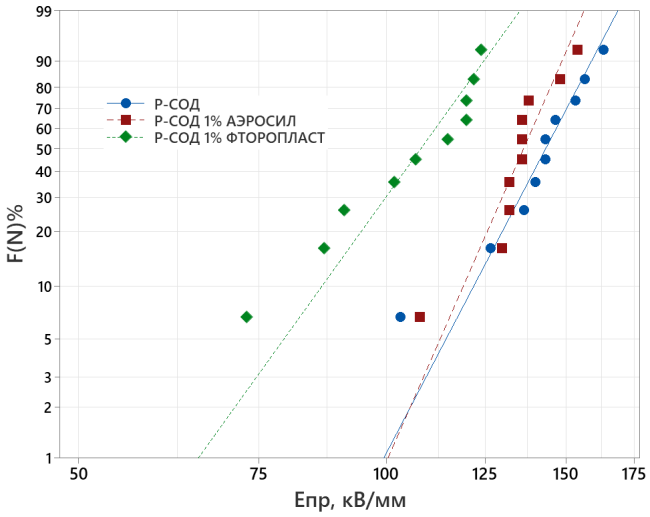


Рис. 7. Распределение электрической прочности $E_{пр}$
в координатах Вейбулла для пленок Р-СОД и композитов на их основе

Fig. 7. Weibull distribution of breakdown strength for R-BAPS films and R-BAPS composites

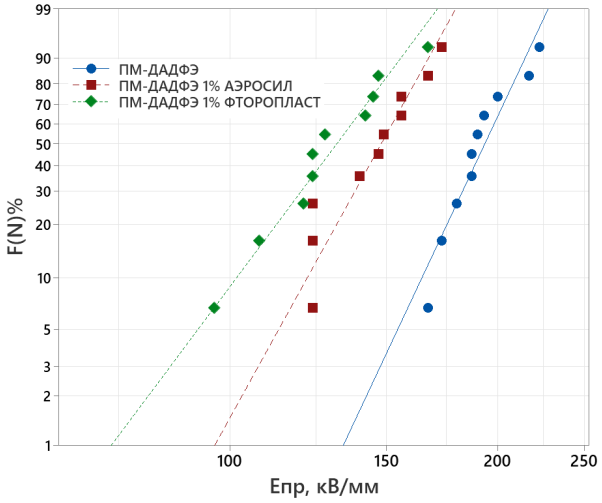


Рис. 8. Распределение электрической прочности $E_{пр}$
в координатах Вейбулла для пленок ПМ-ДАДФЭ и композитов на их основе

Fig. 8. Weibull distribution of breakdown strength for PMDA-ODA films and PMDA-ODA composites

Таблица 5

Электрическая прочность пленок Р-СОД и композитов

Table 5

Breakdown strength of R-BAPS films and R-BAPS composites

Материал	*E*, кВ/мм
Р-СОД	148±15
Р-СОД + 1% Аэросил	140±12
Р-СОД + 1% Фторопласт	113±15

Таблица 6

Электрическая прочность пленок ПМ-ДАДФЭ и композитов

Table 6

Breakdown strength of PMDA-ODA films and PMDA-ODA composites

Материал	*E*, кВ/мм
ПМ-ДАДФЭ	200±20
ПМ-ДАДФЭ + 1% Аэросил	154±18
ПМ-ДАДФЭ + 1% Фторопласт	139±21

Выводы

В данной работе был изучен комплекс электрофизических характеристик ряда термопластичных и термореактивных ПИ: А-мФ (ULTEM), Р-СОД, ДФО-ДАДФЭ и ПМ-ДАДФЭ (ПМ-1).

Определены температуры стеклования T_g ПИ методом ДМА. Показано, что с увеличением T_g наблюдается рост модуля упругости и снижение тангенса угла механических потерь.

Установлено, что в интервале температур ниже T_g проводимость ПИ не зависит от гибкости цепи макромолекул. Удельная проводимость исследованных ПИ пленок составляет 10^{-15}–10^{-12} См/м в температурном диапазоне 25–200°С.

Определена кратковременная электрическая прочность ПИ при переменном напряжении промышленной частоты (50 Гц). Значения величины $E_{пр}$ составляют от 98 до 220 кВ/мм. Из полученных данных следует, что величина $E_{пр}$ отечественной пленки Р-СОД выше $E_{пр}$ пленки А-мФ (ULTEM) на 24%.

Введение наполнителей (Аэросил, фторопласт) в Р-СОД и ПМ-ДАДФЭ не привело к увеличению кратковременной электрической прочности. Целесообразно продолжить разработку композиционных материалов, варьируя природу наполнителя и его процентное содержание, или провести химическую модификацию молекулы ПИ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Damaceanu M.-D., Darie-Nita R.N.** Polyimides: Advances in Blends and Nanocomposites, 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2023. 470 p.

[2] **He X., Xu M., Dou Q., Li Y., Wang Q., Wang T., Tao L.** Preparation of high mechanical performance polyimides by microbranched cross-linked structures // Journal of Polymer Science. 2024. Vol. 63, No. 4. P. 954–965. DOI: 10.1002/pol.20241041

[3] **Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А.** Полиимиды – класс термостойких полимеров. Ленинград: Наука, 1983. 328 с.

[4] **Bell V.L., Stump B.L., Gager H.** Polyimide structure–property relationships. II. Polymers from isomeric diamines // Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition. 1976. Vol. 14. No. 9. P. 2275–2291. DOI: 10.1002/pol.1976.170140917

[5] **Hegde M., Lafont U., Norder B., Picken S.J., Samulski E.T., Rubinstein M., Dingemans T.** SWCNT induced crystallization in an amorphous all aromatic poly(ether imide) // Macromolecules. 2013. Vol. 46. No. 4. P. 1492–1503. DOI: 10.1021/ma302456h

[6] **Юдин В.Е., Светличный В.М., Губанова Т.Н., Григорьев А.И., Суханова Т.Е., Гофман И.В., Диденко А.Л., Попова Е.Н., Федорова Г.Н., Кудрявцев В.В.** Частично кристаллические полиимиды в качестве связующих для углепластиков // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2002. Т. 44. № 2. С. 257–267.

[7] **Mitsui H., Shiono T., Ushiki M., Sato Y., Ono S., Murase T.** Electrical and mechanical properties of thermoplastic polyimide-insulated coaxial cable for use under high-temperature and radioactive conditions // Electrical Engineering in Japan. 1995. Vol. 115. No. 8. P. 12–21. DOI: 10.1002/eej.4391150802

[8] **Costa C., Lopes P., Castro J.** High-performance thermoplastics obtained by fused filament fabrication: effects of harsh environmental conditions of power transformers // Progress in Additive Manufacturing. 2025. Vol. 10. P. 203–218. DOI: 10.1007/s40964-024-00614-z

[9] **Li Y., Yin J., Feng Y., Li J., Zhao H., Zhu C., Yue D., Liu Y., Su B., Liu X.** Metal-organic Framework/ Polyimide composite with enhanced breakdown strength for flexible capacitor // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 429. Art. no. 132228. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132228

[10] **Zhang W., Jiang M., Guan F., Liu S., Wang L., Li Y., Yue D., Li J., Liu X., Feng Y.** Influence of the acceptor-fillers on the dielectric properties of polyimide composites // Polymer Testing. 2023. Vol. 122. Art. no. 10802. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108025

[11] **Ogbonna V.E., Popoola P.I., Popoola O.M.** Silica nanofillers-reinforced polyimide composites for mechanical, thermal, and electrical insulation applications and recommendations; a review // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2368. Art. no. 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/2368/1/012001

[12] **Zhang W., Fu Q., Yuan Q.** Preparation and dielectric properties of polyimide-based composites with Al-Nb co-doped SiO2 // High Performance Polymers. 2024. Vol. 36. No. 2. P. 109–118. DOI: 10.1177/09540083231224158

[13] **Ding S., Yu S., Zhu X., Xie S., Sun R., Liao W.-H., Wong Ch.-P.** Enhanced breakdown strength of polymer composites by low filler loading and its mechanisms // Applied Physics Letters. 2017. Vol. 111. No. 15. Art. no. 153902. DOI: 10.1063/1.4998271

[14] **Zhang C., Liu Z., Tang C., Zhang T., Zhang Y., Zhang Y., Chi Q.** Study of the dielectric and corona resistance properties of pi films modified with fluorene moiety/aluminum sec-butoxide // Polymers. 2024. Vol. 16. No. 6. Art. no. 767. DOI: 10.3390/polym16060767

[15] **Dong Y., Wang Z., Huo S., Lin J., He S.** Improved dielectric breakdown strength of polyimide by incorporating polydopamine-coated graphitic carbon nitride // Polymers. 2022.Vol. 14. No. 3. Art. no. 385. DOI: 10.3390/polym14030385

[16] **Назарычев В.М.** Полноатомное компьютерное моделирование термопластичных полиимидов сварьируемой структурой диаминных фрагментов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2015. 24 с.

[17] **Марченко М.С.** Абсорбционные характеристики полиимидных пленок и конденсаторов на их основе: автореф. дис. ... канд. тех. наук. СПб., 1995. 26 с.

[18] **Tong H., Fu J., Ahmad A., Fan T., Hou Yu., Xu J.** Sulfonyl-containing polyimide dielectrics with advanced heat resistance and dielectric properties for high-temperature capacitor applications // Macromolecular Materials and Engineering. 2019. Vol. 304. No. 4. Art. no. 1800709. DOI: 10.1002/mame.201800709

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАВЛОВ Андрей Александрович – *ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: pavlov_aa@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5459-7509

БОРИСОВА Маргарита Эдуардовна – *профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: vladimirl.borisov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0761-6302

КАМАЛОВ Алмаз Маратович – *старший научный сотрудник, филиал ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"» – Институт высокомолекулярных соединений, канд. техн. наук.*
E-mail: spb.kamalov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2044-957X

ДИДЕНКО Андрей Леонидович – *старший научный сотрудник, филиал ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"» – Институт высокомолекулярных соединений, канд. хим. наук.*
E-mail: vanilin72@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4285-7734

REFERENCES

[1] **M.-D. Damaceanu, R.N. Darie-Nita,** Polyimides: Advances in Blends and Nanocomposites, 1st ed., Elsevier, Amsterdam, 2023.

[2] **X. He, M. Xu, Q. Dou, Y. Li, Q. Wang, T. Wang, L. Tao,** Preparation of High Mechanical Performance Polyimides by Microbranched Cross-Linked Structures, Journal of Polymer Science, 63(4) (2024) 954–965. DOI: 10.1002/pol.20241041

[3] **M.I. Bessonov, M.M. Koton, V.V. Kudryavtsev, L.A. Laius,** Poliimidy – klass termostoikikh polimerov [Polyimides as a class of heat-resistant polymers], Nauka, Leningrad, 1983.

[4] **V.L. Bell, B.L. Stump, H. Gager,** Polyimide structure–property relationships. II. Polymers from isomeric diamines, Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition, 9(14) (1976) 2275–2291. DOI: 10.1002/pol.1976.170140917

[5] **M. Hegde, U. Lafont, B. Norder, S.J. Picken, E.T. Samulski, M. Rubinstein, T. Dingemans,** SWCNT Induced Crystallization in an Amorphous All Aromatic Poly(ether imide), Macromolecules, 4(46) (2013) 1492–1503. DOI: 10.1021/ma302456h

[6] **V.E. Yudin, V.M. Svetlichnyi, G.N. Gubanova et al.,** Semicrystalline polyimides as matrices for carbon-fiber reinforced plastics, Polymer Science, Series A, 44(2) (2002) 148–156.

[7] **H. Mitsui, T. Shiono, M. Ushiki, Y. Sato, S. Ono, T. Murase,** Electrical and mechanical properties of thermoplastic polyimide-insulated coaxial cable for use under high-temperature and radioactive conditions, Electrical Engineering in Japan, 115(8) (1995) 12–21. DOI: 10.1002/eej.4391150802

[8] **C. Costa, P. Lopes, J. Castro,** High-performance thermoplastics obtained by fused filament fabrication: effects of harsh environmental conditions of power transformers, Progress in Additive Manufacturing, 10 (2025) 203–218. DOI: 10.1007/s40964-024-00614-z

[9] **Y. Li, J. Yin, Y. Feng, J. Li, H. Zhao, C. Zhu, D.Yue, Y. Liu, B. Su, X. Liu,** Metal-organic Framework/Polyimide composite with enhanced breakdown strength for flexible capacitor, Chemical Engineering Journal, 429 (2022) 132228. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132228

[10] **W. Zhang, M. Jiang, F. Guan, Sh. Liu, L. Wang, Y. Li, D. Yue, J. Li, X. Liu, Y. Feng,** Influence of the acceptor-fillers on the dielectric properties of polyimide composites, Polymer Testing, 122 (2023) 10802. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108025

[11] **V.E. Ogbonna, P.I. Popoola, O.M. Popoola,** Silica nanofillers-reinforced polyimide composites for mechanical, thermal, and electrical insulation applications and recommendations, Journal of Physics: Conference Series, 2368 (2022) 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/2368/1/012001

[12] **W. Zhang, Q. Fu, Q. Yuan,** Preparation and dielectric properties of polyimide-based composites with Al-Nb co-doped SiO2, High Performance Polymers, 2(36) (2024) 109–118. DOI: 10.1177/0954-0083231224158

[13] **S. Ding, S. Yu, X. Zhu, S. Xie, R. Sun, W.-H. Liao, Ch.-P. Wong,** Enhanced breakdown strength of polymer composites by low filler loading and its mechanisms, Applied Physics Letters, 111(15) (2017) 153902. DOI: 10.1063/1.4998271

[14] **C. Zhang, Z. Liu, C. Tang, T. Zhang, Y. Zhang, Y. Zhang, Q. Chi,** Study of the dielectric and corona resistance properties of pi films modified with fluorene moiety/aluminum sec-butoxide, Polymers, 16(6) (2024) 767. DOI: 10.3390/polym16060767

[15] **Y. Dong, Z. Wang, S. Huo, J. Lin, S. He,** Improved dielectric breakdown strength of polyimide by incorporating polydopamine-coated graphitic carbon nitride, Polymers, 14(3) (2022) 385. DOI: 10.3390/polym14030385

[16] **V.M. Nazarychev,** Polnoatomnoye kompyuternoye modelirovaniye termoplastichnykh poliimidov svariruyemoy strukturoy diaminnykh fragmentov. Diss. kand. fiz.-mat. nauk. [Full-atomic computer modeling of thermoplastic polyimides with a variable structure of diamine fragments. Ph.D. phys.-math. sci. diss.], St. Petersburg, 2015.

[17] **M.S. Marchenko,** Absorbtsionnyye kharakteristiki poliimidnykh plenok i kondensatorov na ikh osnove. Diss. kand. tekh. nauk [Absorption characteristics of polyimide films and PI-based capacitors. Ph.D. tech. sci. diss.], St. Petersburg, 1995.

[18] **H. Tong, J. Fu, A. Ahmad, T. Fan, Yu. Hou, J. Xu,** Sulfonyl-containing polyimide dielectrics with advanced heat resistance and dielectric properties for high-temperature capacitor applications, Macromolecular Materials and Engineering, 4(304) (2019) 1800709. DOI: 10.1002/mame.201800709

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Andrey A. PAVLOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: pavlov_aa@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5459-7509

Margarita E. BORISOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: vladimirl.borisov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0761-6302

Almaz M. KAMALOV – *Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute Named by B.P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute" – Institute of Macromolecular Compounds.*
E-mail: spb.kamalov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2044-957X

Andrei L. DIDENKO – *Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute Named by B.P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute" – Institute of Macromolecular Compounds.*
E-mail: vanilin72@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4285-7734

Поступила: 15.01.2025; Одобрена: 30.01.2025; Принята: 04.02.2025.
Submitted: 15.01.2025; Approved: 30.01.2025; Accepted: 04.02.2025.

Глобальная энергия. Том 31, № 1, 2025. С. 136–145.
Global Energy, 2025, 31 (1); 136–145.

Научная статья
УДК 678
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31110

Д.В. Нечаев ✉ *, О.В. Швецов, С.Б. Ермаков*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ nechaev_dv@spbstu.ru

ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ СВАЙНЫХ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

Аннотация. В настоящей работе было рассмотрено комплексное влияние ультрафиолета (УФ), повышенной температуры и влажности на механические свойства материала свайной трубы из полимерно-композитных материалов (ПКМ) на основе полиэфирной смолы, армированной базальтовым волокном и изготовленной методом мокрой намотки. Показано, что УФ является одним из значимых факторов, влияющих на работоспособность ПКМ-свай. Длительное воздействие УФ-излучения приводит к снижению прочностных свойств и деформационной способности ПКМ. Так, снижение прочностных свойств ПКМ на 20% возникает при УФ-экспозиции в течение 6100 часов. Причиной деградации механических свойств ПКМ под действием УФ-излучения является обширная поверхностная эрозия, приводящая к микрорастрескиванию полиэфирной основы ПКМ с последующим образованием поверхностных и подповерхностных дефектов.

Ключевые слова: ПКМ, УФ-излучение, деградация материала, ресурс материала, климатические испытания, прогнозная модель, климатические факторы старения.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов» (FSEG-2024-0009).

Для цитирования:

Нечаев Д.В., Швецов О.В., Ермаков С.Б. Оценка деградации свайных полимерно-композитных труб под воздействием УФ-излучения, повышенной температуры и влажности // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 136–145. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31110

© Нечаев Д.В., Швецов О.В., Ермаков С.Б., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31110

D.V. Nechaev ✉ , *O.V. Shvetsov, S.B. Ermakov*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ nechaev_dv@spbstu.ru

ASSESSMENT OF DEGRADATION OF PILE POLYMER COMPOSITE PIPES UNDER THE INFLUENCE OF UV RADIATION, ELEVATED TEMPERATURE AND HUMIDITY

Abstract. This article examines the combined effects of ultraviolet (UV) radiation, elevated temperature and humidity on the mechanical properties of the pile pipe made of polymer-composite materials (PCM) based on polyester resin reinforced with basalt fiber and manufactured by the wet winding method. It is shown that UV radiation is one of the significant factors affecting the performance of PCM piles. Long-term exposure to UV radiation leads to a decrease in the strength properties and deformation capacity of PCM. Thus, a 20% decrease in strength properties occurs with UV exposure for 6100 hours. The cause of degradation of the mechanical properties of PCM under the influence of UV radiation is extensive surface erosion, leading to microcracking of the polyester base of the PCM with the subsequent formation of surface and subsurface pores.

Keywords: PCM, UV radiation, material degradation, material resource, climatic tests, predictive model, climatic factors of aging.

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Development of models for the degradation of service properties of metal and composite materials for construction in permafrost conditions" (FSEG-2024-0009).

Citation:

Nechaev D.V., Shvetsov O.V., Ermakov S.B., Assessment of degradation of pile polymer composite pipes under the influence of UV radiation, elevated temperature and humidity, Global Energy, 31 (01) (2025) 136–145, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.31110

Введение. Использование полимерно-композитных материалов (ПКМ) в качестве несущих конструкций при обустройстве объектов капитального строительства, в том числе в районах Крайнего Севера, является очень перспективным направлением, в первую очередь за счет низкой массы и облегчения логистики [1–3]. Однако в настоящее время эти материалы не нашли широкого распространения, что связано как с недостаточной нормативной базой, которая бы регламентировала условия их эксплуатации, так и с недостаточно полной базой данных о длительных характеристиках ПКМ, деградации их структуры и свойств в условиях длительной эксплуатации в экстремальных геоклиматических условиях [4].

Среди множества внешних факторов, влияющих на свойства ПКМ в условиях эксплуатации, одним из наиболее значительными является солнечное ультрафиолетовое (УФ) излучение [5]. При этом деструкция поверхности образцов при совместном воздействии УФ-излучения и термовлажностных режимов оказывается интенсивнее, чем при их последовательном воздействии [6–11], что подтверждается результатами ряда исследований. Например, в работе [7] при испытаниях углепластика на основе эпоксидной матрицы на старение под воздействием УФ-излучения при температуре 60 °C и в атмосфере насыщенного водяного пара показано, что потеря массы опытного образца при последовательном воздействии двух факторов на протяжении 500 часов

© Nechaev D.V., Shvetsov O.V., Ermakov S.B., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

составила 0,8%, а при одновременном – 1,2%. Данный результат объясняется синергетическим эффектом обширной эрозии, приводящей к микрорастрескиванию матрицы и нарушению границ «матрица–волокно» с последующим образованием пустот. При этом максимальная деградация механических свойств при испытании на растяжение была обнаружена у образцов, подвергнутых синергетическому воздействию влаги, температуры и УФ-излучения, и составила 29%.

Аналогичный результат получен в работе [8] при исследовании деструкции под воздействием УФ-излучения шести марок стеклопластиков на основе винилэфирных и эпоксидных матриц в сухом и влажном воздухе. Было показано, что причиной ускоренной деструкции образцов ПКМ во влажной среде являлся процесс удаления продуктов разрушения матрицы под воздействием УФ-излучения во время выдержки опытных образцов во влажной среде, из-за чего их поверхность становилась доступнее для УФ-радиации. При этом авторами работы [12] установлено, что температурное воздействие является важным параметром кинетики разрушения ПКМ под воздействием УФ-излучения. Аналогично авторами работы [13] установлено, что наложение теплового воздействия является ключевым фактором протекания и ускорителем вышеперечисленных химических процессов деструкции полимерной матрицы. Таким образом, разрушение поверхности образцов при совместном воздействии УФ-излучения, тепла и влаги протекает интенсивнее, чем при их последовательном или отдельным воздействии.

Однако многообразие видов ПКМ с различными механическими и эксплуатационными свойствами является существенным блокиратором при разработке методик расчета работоспособности конструкциq из них, обеспечивающих прогнозируемую долговечность [9], что, в свою очередь, тормозит процесс внедрения ПКМ во многие отрасли промышленности. При этом известно, что эффективность ПКМ определяется прочностью, жесткостью, пластичностью и другими физико-механическими параметрами, изменение одного из которых может влиять и на остальные механические и эксплуатационные свойства материала [4, 14]. Следовательно, учет процесса деградации ПКМ во время его эксплуатации в различных условиях должен являться частью инженерных расчетов по проектированию элементов различных конструкций капитального строительства для осуществления прогноза долговечности применяемого материала.

Целью настоящей работы является оценка деградации и разработка методики прогнозирования срока службы несущих конструкций из ПКМ, обеспечивающих их надежность и работоспособность с учетом воздействия УФ-излучения, температуры и влаги.

Методы и материалы

Материалом исследования являлись вырезанные на станке ЧПУ стандартные образцы по ГОСТ Р 54924-2017 из сегмента свайной ПКМ-трубы на основе полиэфирной смолы, армированной базальтовым волокном и изготовленной методом мокрой намотки. Перед испытанием опытные образцы кондиционировались по ГОСТ 12423-2013 в стандартной атмосфере 23/50, класс 2. Оценка влияния климатического воздействия на материал проводилась по ГОСТ 9.708-83 (метод 2). Метод включает в себя ускоренные лабораторные испытания при моделировании искусственных климатических факторов. При проведении исследований были реализованы два типа воздействия на опытные образцы ПКМ – это воздействие УФ-излучения и воздействие повышенной температуры (+45 °С) и влажности (90%).

Выемка образцов осуществлялась через 24, 48, 96, 168, 1440, 4100 и 6100 часов. В качестве критериев оценки выступали внешний вид образцов после испытаний и падение механических свойств на растяжение по сравнению с образцами-свидетелями.

Климатические испытания проводились в камере тепла-влаги-холода, в качестве источника УФ-излучения применялись лампы UVA 340.

Испытания на одноосное растяжение проводились по ГОСТ Р 54924-2017 с использованием испытательной машины Zwick/Roell Z100 при температуре 25 °С, относительной влажности 61%

и скорости движения траверсы, равной 2 мм/мин. Перед проведением испытаний на растяжение образцы повторно кондиционировались.

Оценка деградации осуществлялась путем расчета соотношения значений оцениваемых механических свойств по формуле:

$$k_R = R_t / R_0 ,$$

где R_t – измененные средние значения механических свойств после экспонирования; R_0 – исходное среднее значение соответствующего показателя при испытании на осевое растяжение.

Исследование деградации поверхности проводилось на предварительно отшлифованных образцах, вырезанных из рабочей части в поперечном направлении, с использованием оптического микроскопа Reichert-Jung MeAF-3A, оснащенного анализатором изображений Thixomet Pro.

Результаты

Перед проведением климатических испытаний были оценены механические свойства образцов-свидетелей, не подвергавшихся деградационным воздействиям (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний образцов-свидетелей на осевое растяжение

Table 1

Results of axial tension tests of witness samples

№ образца	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Относительное удлинение, %
1	218,6	19,9	1,3
2	220,6	19,4	1,4
3	218,3	18,7	1,6
4	206,5	19,6	1,5
5	230,6	19,5	1,4
Среднее значение	**218,9**	**19,4**	**1,5**
Доверительный интервал	**7,5**	**0,4**	**0,1**

Характерный внешний вид образцов-свидетелей после испытаний на растяжение приведен на рис. 1.

После извлечения образцов из климатической камеры по завершению каждого этапа выемки выполнялся визуально-измерительный контроль фактического состояния образцов. Показано, что вне зависимости от длительности пребывания образцов в климатической камере каких-либо поверхностных дефектов обнаружено не было. На открытых торцах образцов также не наблюдалось видимых невооруженным взглядом дефектов, указывающих на деградацию материала, таких как, например, образование махры наполнителя на торцах образца, расслоения, набухания и т.п. Характерный внешний вид образца по завершению каждого этапа выемки приведен на рис. 2.

Результаты визуально-измерительного контроля образцов после испытаний показали отсутствие видимых невооруженным глазом дефектов. Это позволяет утверждать, что деградация ПКМ от воздействия влаги, тепла и УФ-излучения носит микроструктурный характер.

Обобщенные результаты испытаний на растяжение опытных образцов после различного времени выдержки и сравнение их с образцами-свидетелями приведены на рис. 3.

Рис. 1. Характерный внешний вид образцов после испытаний на растяжение: а) сверху; б) сбоку
Fig. 1. Characteristic appearance of samples after tensile testing: a) top view; b) side view

Рис. 2. Внешний вид образцов после климатических испытаний: а) вид сверху; б) вид сбоку
Fig. 2. Appearance of samples after climatic tests: a) top view; b) side view

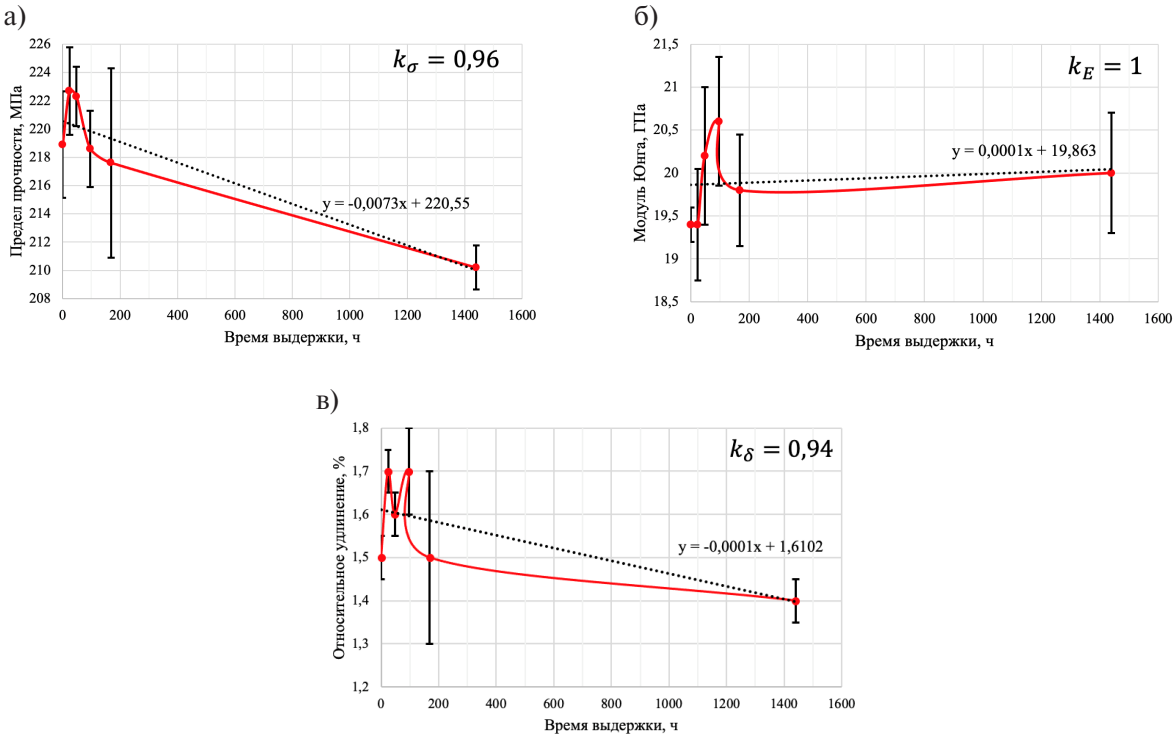


Рис. 3. Зависимость изменения значений: а) предела прочности; б) модуля Юнга; в) относительного удлинения – от времени выдержки в испытательной среде
Fig. 3. Dependence of the change in the values of tensile strength (a); Young's modulus (b); relative elongation (c) on the holding time in the test environment

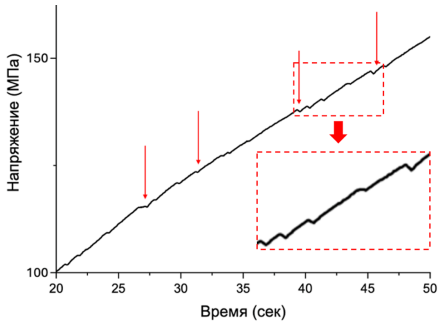


Рис. 4. Участки образования поперечных трещин во внешнем слое образца в процессе его растяжения
Fig. 4. Areas of formation of transverse cracks in the outer layer of the sample during its stretching

Обсуждение

Характер разрушения образцов в исходном состоянии может быть описан как хрупкое разрушение поверхностного слоя с расслоением внутренних слоев. В процессе растяжения отмечалось постепенное растрескивание внешнего слоя, что приводило к кратковременному снижению напряжения материала и выражалось в образовании пиков на графике напряжение/время (рис. 4).

Из обобщенных результатов испытаний на растяжение опытных образцов после различного времени выдержки и сравнения их с образцами-свидетелями видно, что при малом времени выдержки (до 168 часов) деградации механических свойств под действием УФ-излучения, тепла и влаги не происходит. При увеличении времени (до 1440 часов) происходит незначительная деградация предела прочности (k_σ = 0,96) и относительного удлинения (k_δ = 0,94), при этом изменение свойств имеет слабовыраженный, приближенный к линейному характер. Наряду с этим упругие свойства опытного материала, с учетом доверительных интервалов, не изменились (k_E = 1). Показано, что кратковременное облучение УФ приводит к увеличению механических свойств за счет дополнительного отверждения полимерной матрицы, что согласуется с результатами работ [15, 16].

На основании полученных регрессионных уравнений было установлено, что падение предела прочности на 20% в выбранных условиях экспонирования произойдет через 6103 часа, а относительного удлинения – через 4125 часов. Для подтверждения данных выводов были проведены контрольные экспозиции образцов длительностью 4100 и 6100 часов, полностью подтвердившие результаты регрессионного анализа.

Для установки причин деградации опытных образцов ПКМ было проведено исследование поперечного сечения образцов в исходном состоянии и после выдержек различной протяженности (до 1440 часов) на оптическом микроскопе (рис. 5).

Как следует из представленных фотографий, в образце после экспонирования на протяжении 1440 часов полностью сформированы микротрещины в дефектном-приповерхностном слое, которые являются концентраторами напряжений и укоряют рост и развитие трещин по всему сечению ПКМ при разрушении. Этот вывод согласуется с данными работ [7, 8, 17, 18]. Отмечено, что с увеличением времени эксплозии толщина дефектного слоя после выдержки в течение 1440 часов составляет порядка 100–150 мкм, а 6100 часов – порядка 200–300 мкм.

Заключение

В ходе проведения работы была оценена степень деградации при совместном воздействии УФ-излучения, повышенной температуры и влаги на образцы материала свайной трубы из ПКМ на основе полиэфирной смолы, армированной базальтовым волокном и изготовленной методом мокрой намотки. Установлено, что при малом времени выдержки деградации механических

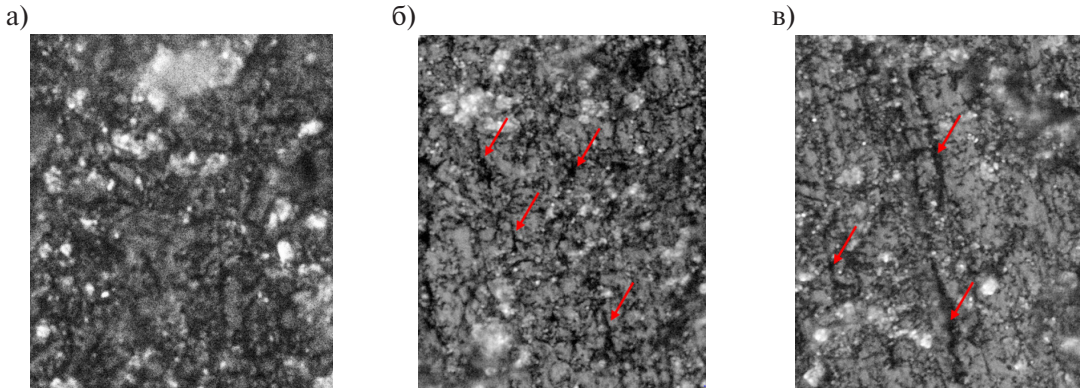


Рис. 5. Структура поверхностного слоя образца-свидетеля (а), после экспонирования на протяжении 1440 часов в период зарождения микротрещин (б); и 6100 часов в период развития и роста микротрещин (в)

Fig. 5. Structure of the surface layer of the witness sample (a), after exposure for 1440 hours during the period of microcrack initiation (b); and 6100 hours during the stage of microcrack development and growth (c)

свойств не происходит. При увеличении времени происходит незначительная деградация предела прочности ($k_{\sigma} = 0{,}96$) и относительного удлинения ($k_{\delta} = 0{,}94$), изменение свойств имеет слабовыраженный, приближенный к линейному характер. Были рассчитаны регрессионные уравнения падения механических свойств и определено, что падение предела прочности на 20% в выбранных условиях экспонирования произойдет через 6103 часа, а относительного удлинения – через 4125 часов. Данные результаты были проверены экспериментально, и была доказана линейность падения механических свойств при совместном воздействии УФ-облучения и термовлажностных режимов. При этом реальные условия эксплуатации данного материала в северных районах, даже в летний период, менее интенсивные, что делает его пригодным для дальнейшего применения при строительстве различных конструкций и сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Кустов А.А.** Необходимость в разработке новых полимерных композиционных материалов для воздухоопорных и тентовых сооружений, работающих в суровых условиях эксплуатации // Актуальные вопросы современной науки. 2016. С. 240–243.

[2] **Череповицын А.Е., Цветков П.С., Евсеева О.О.** Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 463–478. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15

[3] **Ермаков Б.С., Швецов О.В., Вологжанина С.А., Нечаев Д.В., Карпов И.Д.** Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур // Горная промышленность. 2024. № S5. С. 198–203. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203

[4] **Krauklis A.E., Karl C.W., Rocha I.B.C.M., Burlakovs J., Ozola-Davidane R., Gagani A.I., Starkova O.** Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites – modular and multiscale methods, Polymers, 14 (1) (2022) 216, DOI: 10.3390/polym14010216

[5] **Ратнер С.Б., Ярцев В.П.** Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? М.: Химия, 1992. 319 с.

[6] **Лебедев М.П., Старцев О.В., Петров М.Г., Копырин М.М.** Образование микротрещин при климатическом старении полимерных композиционных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 4. С. 2–11. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-4-2-11

[7] **Kumar B.G., Singh R.P., Nakamura T.** Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation, Journal of Composite Materials, 36 (24) (2002) 2713–2733, DOI: 10.1106/002199802028682

[8] **Lu T., Solis-Ramos E., Yi Y.-B., Kumosa M.** Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites, Polymer Degradation and Stability, 131 (2016) 1–8. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.025

[9] **Гусев Е.Л., Черных В.Д.** Перспективные подходы и методы к решению проблемы прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата. 2024. С. 253–256. DOI: 10.24412/cl-37255-2024-1-253-256

[10] **Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L., Chailan J.F.** Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 68 (2015) 235–241. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.09.028

[11] **Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Polyakov V.V.** Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate, Procedia Structural Integrity, 30 (2020) 71–75. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.012

[12] **Balasubramanian K.R., Kumar K.R., Prabhakaran S.P.S., Jinshah B.S., Abhishek N.** Thermal degradation studies and hybrid neural network modelling of eutectic phase change material composites, International Journal of Energy Research, 46 (2022) 15733–15755. DOI: 10.1002/er.8272

[13] **Каблов Е.Н., Старцев В.О.** Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. 2019. №. 12. С. 7–16. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-12-7-16

[14] **Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., Elharfi A.** Polymer composite materials: A comprehensive review, Composite Structures, 262 (2021) 113640. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640

[15] **Kim D.S., Seo W.H.** Ultraviolet-curing behavior and mechanical properties of a polyester acrylate resin, Journal of Applied Polymer Science, 92 (6) (2004) 3921–3928, DOI: 10.1002/app.20422

[16] **Decker C.** Kinetic study and new applications of UV radiation curing, Macromolecular Rapid Communications, 23 (18) (2002) 1067–1093. DOI: 10.1002/marc.200290014

[17] **Awaja F., Nguyen M.-T., Zhang S., Arhatari B.** The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42 (4) (2011) 408–418. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.12.015

[18] **Awaja F., Zhang S., Tripathi M., Nikiforov A., Pugno N.** Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, Progress in Materials Science, 83 (2016) 536–573, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.07.007

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НЕЧАЕВ Даниил Валерьевич – *инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5997-143X

ШВЕЦОВ Олег Викторович – *инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: shvec_off@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9368-4074

ЕРМАКОВ Сергей Борисович – *директор НИОЦ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4243-0984

REFERENCES

[1] **A.A. Kustov,** Need for development of new polymeric composite materials for the airsupported and awning constructions working in severe service conditions, Aktual'nye voprosy sovremennoi nauki [Current issues of modern science], (2016) 240–243.

[2] **A.E. Cherepovitsyn, P.S. Tsvetkov, O.O. Evseeva,** Kriticheskii analiz metodicheskikh podkhodov k otsenke ustoichivosti arkticheskikh neftegazovykh proektov, Journal of Mining Institute, 249 (2021) 463–478, DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15

[3] **B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov, S.A. Vologzhanina, D.V. Nechaev, I.D. Karpov,** The influence of water-repellent coating on the performance of structures made of polymer composite materials in conditions of extremely low temperatures, Russian Mining Industry, 5S (2024) 198–203, DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203

[4] **A.E. Krauklis, C.W. Karl, I.B.C.M. Rocha, J. Burlakovs, R. Ozola-Davidane, A.I. Gagani, O. Starkova,** Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites – modular and multiscale methods, Polymers, 14 (1) (2022) 216, DOI: 10.3390/polym14010216

[5] **S.B. Ratner, V.P. Iartsev,** Fizicheskaia mekhanika plastmass. Kak prognoziruiut rabotosposobnost'? [Physical mechanics of plastics. How is performance predicted?] Moscow: Khimiia, 1992. 319 p.

[6] **M.P. Lebedev, O.V. Startsev, M.G. Petrov, M.M. Kopyrin,** Formation of microcracks during climatic aging of polymer composite materials, All materials. Encyclopaedic reference manual, 4 (2022) 2–11, DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-4-2-11

[7] **B.G. Kumar, R.P. Singh, T. Nakamura,** Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation, Journal of Composite Materials, 36 (24) (2002) 2713–2733, DOI: 10.1106/002199802028682

[8] **T. Lu, E. Solis-Ramos, Y.-B. Yi, M. Kumosa,** Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites, Polymer Degradation and Stability, 131 (2016) 1–8. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.025

[9] **E.L. Gusev, V.D. Chernykh,** Perspektivnye podkhody i metody k resheniiu problemy prognozirovaniia opredeliaiushchikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov [Promising approaches and methods for solving the problem of predicting the defining characteristics of composite materials], Fiziko-tekhnicheskie problemy dobychi, transporta i pererabotki organicheskogo syr'ia v usloviiakh kholodnogo klimata [Physical and technical problems of extraction, transportation and processing of organic raw materials in cold climate conditions], (2024) 253–256, DOI: 10.24412/cl-37255-2024-1-253-256

[10] **L. Belec, T.H. Nguyen, D.L. Nguyen, J.F. Chailan,** Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 68 (2015) 235–241. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.09.028

[11] **A.K. Kychkin, O.V. Startsev, M.P. Lebedev, V.V. Polyakov,** Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate, Procedia Structural Integrity, 30 (2020) 71–75. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.012

[12] **K.R. Balasubramanian, K.R. Kumar, S.P.S. Prabhakaran, B.S. Jinshah, N. Abhishek,** Thermal degradation studies and hybrid neural network modelling of eutectic phase change material composites, International Journal of Energy Research, 46 (2022) 15733–15755. DOI: 10.1002/er.8272

[13] **E.N. Kablov, V.O. Startsev,** Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. Influence of significant factors, Russian Metallurgy (Metally), 2020 (4) (2020) 364–372, DOI: 10.1134/S0036029520040102

[14] **R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, A. Elharfi,** Polymer composite materials: A comprehensive review, Composite Structures, 262 (2021) 113640. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640

[15] **D.S. Kim, W.H. Seo,** Ultraviolet-curing behavior and mechanical properties of a polyester acrylate resin, Journal of Applied Polymer Science, 92 (6) (2004) 3921–3928, DOI: 10.1002/app.20422

[16] **C. Decker,** Kinetic study and new applications of UV radiation curing, Macromolecular Rapid Communications, 23 (18) (2002) 1067–1093. DOI: 10.1002/marc.200290014

[17] **F. Awaja, M.-T. Nguyen, S. Zhang, B. Arhatari,** The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42 (4) (2011) 408–418. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.12.015

[18] **F. Awaja, S. Zhang, M. Tripathi, A. Nikiforov, N. Pugno,** Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, Progress in Materials Science, 83 (2016) 536–573, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.07.007

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Daniil V. NECHAEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5997-143X

Oleg V. SHVETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: shvec_off@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9368-4074

Sergey B. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4243-0984

Поступила: 16.02.2025; Одобрена: 05.03.2025; Принята: 19.03.2025.
Submitted: 16.02.2025; Approved: 05.03.2025; Accepted: 19.03.2025.