



2024
№4(24)

Окружающая среда и энергостудение

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)



<http://www.jeees.ru>

ISSN 2658-6703
(Online)

Окружающая среда и энергосистемы

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)

2024 №4(24)

Научный, образовательный, культурно-просветительский сетевой журнал
Scientific, educational, cultural and educational network Journal

Основан в 2018 году,
1-й номер вышел в январе 2019 г.
Выходит четыре раза в год
при научно-информационной поддержке
Географического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова.

Founded in 2018,
The 1st issue was released in January 2019.
Published four times a year with scientific and
information support
Geographical faculty of Lomonosov Moscow
State University.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации Эл № ФС 77 - 74521 от 7 декабря 2018 г.

Индексируется в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU, Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», Public Knowledge Project, Open Archives Initiative, OpenAIRE.

С 12 февраля 2024 г. включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук ВАК Минобрнауки России по специальности 1.6.21. Геоэкология (географические науки).



Главный редактор

Залиханов Михаил Чоккаевич, д.г.н., профессор,
академик РАН (МГУ им. М. В. Ломоносова).

Зам. главного редактора

Дегтярев Кирилл Станиславович, к.геогр.н
(МГУ им. М. В. Ломоносова)

Ответственный секретарь

Соловьев Дмитрий Александрович, к. ф.-м.н.
(ИО РАН).

Редакционная коллегия:

Бабурин Вячеслав Леонидович, д.г.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Безруких Павел Павлович, д.т.н., академик-секретарь РИА (МЭИ)
Березкин Михаил Юрьевич, к.геогр.н (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Бушуев Виталий Васильевич, д.т.н., профессор (ГУ Институт энергетической стратегии).
Гулев Сергей Константинович, д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент РАН (ИО РАН).
Дегтярев Кирилл Станиславович, к.геогр.н (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Добролюбов Сергей Анатольевич, д.геогр.н., профессор, член-корреспондент РАН (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Залиханов Алим Михайлович, к.геогр.н, (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Киселева Софья Валентиновна, к.ф.-м.н. (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Красовская Татьяна Михайловна, д.геогр.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Моргунова Мария Олеговна, к.э.н. (KTH Royal Institute of Technology, Sweden).
Нефедова Людмила Вениаминовна (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Нигматулин Роберт Искандрович, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН (ИО РАН).
Панченко Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент (Российский университет транспорта (МИИТ))
Показеев Константин Васильевич, д.ф.-м.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Рафикова Юлия Юрьевна, к.геогр.н. (МГУ им. М.В. Ломоносова)
Соловьев Дмитрий Александрович, к. ф.-м.н. (ИО РАН).
Слипенчук Михаил Викторович, д.э.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Тихунов Владимир Сергеевич, д.геогр.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).

Адрес редакции:

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, к. 19, НИЛ
возобновляемых источников энергии географического факультета
МГУ им. М.В.Ломоносова
Тел./ факс +7 (499) 939-42-57
e-mail: info@jeees.ru
Официальный сайт журнала <http://jeees.ru>

Окружающая среда и энерговедение. 2024 №4(24)

Научный, образовательный, культурно-просветительский сетевой журнал (периодическое сетевое издание)
Редактор К.С.Дегтярев
Корректор К.Г.Горошкин
Верстка М.Ю.Березкин
Перевод на английский язык
К.С.Дегтярев
Подписан в свет 28.12.2024.

Издатель:

ООО "Глобализация и устойчивое развитие. Институт энергетической стратегии"
125009, г. Москва, Дегтярный переулок, д. 9, офис 011.
Тел./факс: +7 (495) 229-4241 доб. 224.
E-mail: guies@guies.ru.

Перепечатка или воспроизведение материалов номера любым способом полностью или по частям допускается только с письменного разрешения Издателя.

Учредитель: Соловьев Д.А.

© Редакция журнала

«Окружающая среда и энерговедение», 2024

Государственный Рубрикатор НТИ России
(ГРНТИ): 37; 39; 44; 45

Содержание

Нефедова Л.В., Соловьев Д.А. Позиция России на климатическом саммите COP29 и роль природных экосистем в балансе парниковых газов в стране.....	4
Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусные ветроэнергетические установки: уменьшение потерь мощности при циклическом движении платформ	16
Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю. Децентрализованная электрогенерация на ВИЭ в Республике Саха (Якутия): потенциал, состояние, перспективы.....	34
Дегтярев К.С., Рафикова Ю.Ю. XIV Всероссийская научная молодёжная школа с международным участием «Возобновляемые источники энергии. Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике»	50
Аликин Р.О. Модельная оценка экономических последствий декарбонизации электроэнергетики	62
Андреева К.А., Васьков А.Г., Айнulloева И.Н., Романюк Н.С. Моделирование зарядных и разрядных характеристик аккумуляторных батарей на основе натурных данных.....	73
Мордынский А.В. Выбор моделей для расчёта полной солнечной радиации ясного неба на наклонной плоскости в условиях высоких широт России.	85
Романюк Н.С., Васьков А.Г., Андреева К.А., Васильева А.А. Исследование гибридных систем накопления энергии на основе суперконденсаторов.	103

Content

Nefedova L.V., Solov'yev D.A. The position of Russia at the COP29 Climate Summit and the Role of Natural Ecosystems in the Country's Greenhouse Gas Balance	4
Chekarev K.V., Zalikhonov A.M. Sailing Wind Power Plants: Reduction of Power Losses during Platform Cycling	16
Nefedova L.V., Rafikova Y.Y. Decentralized Electricity Generation Using Renewable Energy Sources in the Republic of Sakha (Yakutia): Potential, Status, Prospects.....	34
Degtyarev K.S., Rafikova Y.Y. XIV All-Russian Youth Scientific School with International Participation "Renewable Energy Sources. The Role of Renewable Energy for Transition to Carbon-Neutral Economy"	50
Alikin R.O. Model Assessment of the Economic Consequences of Decarbonization of the Electric Power Industry	62
Andreeva X.A., Vaskov A.G., Ainulloeva I.N., Romaniuk N.S. Modeling Charge and Discharge Characteristics of Batteries Based on Field Data	73
Mordynskiy A.V. Selection of Models for Calculating Total Clear Sky Solar Radiation in an Inclined Plane at High Latitudes in Russia.....	85
Romaniuk N.S., Vaskov A.G., Andreeva X.A., Vasileva A.A. Study of Hybrid Energy Storage Systems Based on Supercapacitors.....	103

УДК 327.7: 504.06

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-4-4-15

EDN: MQMWID

Позиция России на климатическом саммите COP29 и роль природных экосистем в балансе парниковых газов в стране

^{1,1} Нефедова Людмила Вениаминовна [0000-0002-6022-0617],^{2,2} Соловьев Дмитрий Александрович [0000-0001-5591-3067]¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, РоссияE-mail: ¹nefludmila@mail.ru, ²solovev@ocean.ru

Аннотация. В статье представлен обзор основных обсуждавшихся вопросов и решений международной конференции по изменению климата в Баку в ноябре 2024 г. Изложена позиция России по направлениям финансирования мер по снижению антропогенного воздействия, а также смягчения последствий адаптации наименее развитых стран к глобальным климатическим изменениям. Подробно рассмотрен вопрос оценок параметров выбросов и поглощения углекислого газа природными экосистемами на территории России в стратегии низкоуглеродного развития страны.

Ключевые слова: эмиссия углекислого газа, климатические изменения, адаптация, поглощение CO₂ лесами, международное финансирование

1 Введение

Глобальные климатические изменения являются одной из основных проблем современности. Международное сообщество ежегодно проводит конференции под эгидой Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН), посвященные вопросам борьбы с климатическими изменениями, смягчения рисков изменений и адаптации к их последствиям. В городе Баку (Азербайджан) с 11 по 22 ноября 2024 года состоялась 29-я сессия Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP29). В этом крупнейшем мероприятии принимали участие более 70 тысяч человек из 200 стран. Участники конференции вели дискуссии по широкому спектру вопросов, посвященных уменьшению последствий изменения климата, а также по вопросам финансовой поддержки развивающихся стран. Большой делегацией на

COP29 была представлена и Российская Федерация. В состав делегации, возглавляемой премьер-министром РФ Михаилом Мишустиним, вошли представители различных министерств, госструктур, научных кругов самых разных направлений. В «Голубой зоне», где проходят важные мероприятия с участием высокопоставленных лиц, также был открыт российский павильон.

Цели и задачи данного исследования — проследить позиции представителей различных стран и коалиций по вопросам глобальных климатических изменений, мер по смягчению их последствий и адаптации наименее развитых в экономическом отношении стран, выделить основные решения, принятые на данной конференции и их значение для мирового сообщества, рассмотреть позицию Российской Федерации по направлению оценки суммарного антропогенного воздействия на окружающую среду и мер для достижения углеродной нейтральности экономики.

При работе над статьей использованы информационные материалы сайтов Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (UNFCCC), Еврокомиссии (ЕС), Евразийской экономической комиссии, Минэкономразвития РФ, Росстата, Российского экологического общества, а также публикации и сообщения научных организаций: Института глобального климата и экологии и пилотного проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Карбоновые полигоны».

2 Темы обсуждения, позиции сторон и основные итоги COP29

На климатической конференции обсуждались вопросы финансовой поддержки развивающихся стран, международной торговли углеродными квотами, национальных планов адаптации к климатическим изменениям и участия в них коренных народов, отчетности и прозрачности действий стран-участниц. Вызывались и сомнения в эффективности мер по предотвращению климатических изменений. Так, участники саммита выразили беспокойство темпами снижения выбросов, которые всё ещё недостаточны для предотвращения климатического кризиса. Текущий год, по прогнозам, станет самым теплым за всю историю наблюдений, что подтверждают растущие последствия изменения климата: наводнения в Африке унесли тысячи жизней и лишили миллионы людей продовольствия; оползни в Азии уничтожили целые деревни; засуха в Южной Америке привела к обмелению рек, критически важных для транспорта и сельского хозяйства; вызванные дождями наводнения в Испании и США привели к сотням погибших и значительным экономическим потерям.

Представители бизнеса и эксперты, обсуждали в рамках саммита широкий круг вопросов, связанных с климатическим регулированием и будущим населения Планеты. В рамках первого заседания Евразийского климатического клуба участники дискуссии, среди которых были помощник президента РФ, специальный

представитель по вопросам климата Руслан Эдельгериев, член Коллегии (министр) по торговле ЕЭК Андрей Слепнев, старший вице-президент по ESG ПАО «Сбербанк» Татьяна Липская, обсудили единые подходы к углеродному регулированию внутри объединения и выразили свою готовность к всестороннему международному диалогу. Не меньшее внимание было уделено вопросам развития городской среды и инноваций с ориентиром на человека. Так, например, в рамках сессии «Есть ли будущее у человека в «умном» городе в эпоху климатического кризиса?» эксперты из Бразилии, Индии, Нигерии, Турции и России поделились своим опытом в области создания комфортной, инновационной и климатически нейтральной городской среды.

СОР29 стал третьей подряд конференцией, проведенной в стране, активно добывающей ископаемое топливо. Представители Азербайджана и ОПЕК акцентировали внимание на важности нефтегазовых ресурсов, назвав их «даром Божиим». Значимых решений по сокращению использования ископаемого топлива или увеличению мощностей возобновляемой энергетики принято не было. Развивающиеся страны подняли вопрос о влиянии климатических торговых барьеров на их экономику. Они заявили, что высокая стоимость подобных инициатив препятствует их усилиям по «озеленению» экономики. Особое внимание было уделено углеродному налогу на границе, который планируется ввести в Европейском Союзе (ЕС). Однако не меньшую тревогу вызвала возможность введения США новых пошлин на импорт при администрации Дональда Трампа. Было принято решение рассмотреть этот вопрос на будущих саммитах [1].

Председатель Правительства России Михаил Мишустин выступил на саммите мировых лидеров по вопросам климатических действий в рамках 29-й сессии Конференции Сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата. В своем выступлении 13 декабря 2024 г. Председатель Правительства России отметил, что Россия активно участвует в мерах, которые принимает международное сообщество для противостояния глобальным изменениям климата. Далее Михаил Мишустин подчеркнул, что Россия выступает за объединение усилий в борьбе с изменениями климата, где он выделил четыре приоритета:

1. Согласование новой коллективной цели в области климатического финансирования в интересах развивающихся государств.
2. Плавный переход к низко-эмиссионной энергетике.
3. Внедрение практических механизмов реализации международных договорённостей.
4. Налаживание кооперации научных сообществ.

Также М. Мишустин сообщил, что России удалось сократить выбросы парниковых газов более чем в два раза от уровня 1990 года. «К 2060-му страна планирует выйти на углеродную нейтральность. Упор делается на повышение энергетической эффективности, развитие электротранспорта, внедрение современных решений в сельское и лесное хозяйство. В России уже 85% энергобаланса обеспечивается чистой, низко-эмиссионной генерацией. Это в первую очередь газовая, атомная энергетика, а также энергия из возобновляемых источников. В стране наращиваются собственные технологии и производственные мощности

для декарбонизации отраслей. Используются и природные возможности. В России расположена пятая часть глобальных лесных ресурсов. Объём поглощения превышает 1 млрд тонн эквивалента углекислого газа в год. Россия остаётся приверженной целям низкоуглеродного развития. Мы совершенствуем законодательство, оказываем добровольное содействие уязвимым странам на климатическом направлении и готовы продолжить такую работу в тесном диалоге со всеми заинтересованными государствами» [2]. Поскольку данное значение поглощения парниковых газов (ПГ) природными системами России ранее не указывалось в статистических материалах по балансу парниковых газов и не озвучивалось на международной арене, этот вопрос получил широкое обсуждение в научных и политических кругах. Ниже в статье мы рассмотрим научное обоснование данного значения поглощения парниковых газов в нашей стране. А сейчас рассмотрим основные итоги COP 29.

1. Главной темой COP29 в Баку стало финансирование борьбы с изменением климата. На мероприятии собрались представители 200 стран, и было достигнуто прогрессивное соглашение, которое позволит втрое увеличить климатическое финансирование для развивающихся стран, что соответствует увеличению с объемов прежней согласованной в рамках переговоров по климату цели в 100 миллиардов долларов США в год до 300 миллиардов долларов США в год к 2035 году. Это укрепит усилия по взаимодействию всех участников климатического процесса с целью увеличения объема финансирования для развивающихся стран из государственных и частных источников до 1,3 триллиона долларов США в год к 2035 году. Эта так называемая Новая коллективная количественная цель (НККЦ) по финансированию климата — NewCollectiveQuantifiedGoalonClimate-Finance (NCQG) — была согласована после двух недель интенсивных переговоров и нескольких лет подготовительной работы, в ходе которой все страны должны были единогласно согласовать все детали соглашения. Однако развивающиеся государства сочли эту сумму недостаточной для масштабных преобразований, необходимых для перехода к чистой энергии. Кроме того, многие представители этих стран критиковали отсрочку на десятилетие, заявляя, что это только замедлит переход к устойчивым источникам энергии. Дополнительное недовольство вызвали предложения о включении взносов развивающихся стран в общий целевой показатель, что особенно активно оспаривала Индия.

Однако, по мнению Саймона Стила, исполнительного секретаря РККК ООН, «Эта новая финансовая цель представляет собой "страховой полис" для человечества на фоне ухудшающихся последствий изменения климата, затрагивающих все страны. Но, как и любая другая страховка, она работает только в том случае, если взносы выплачиваются полностью и в срок. Кроме того, это соглашение позволит сохранить масштабный рост чистой энергии и поможет всем странам воспользоваться его существенными преимуществами: увеличением числа рабочих мест, укреплением роста, удешевлением чистой энергии для всех» [3]. Данная финансовая цель основывается на значимых успехах в осуществлении мер по борьбе с изменением климата, согласованных на COP27, в ходе которой был дан

старт работе первого в своем роде Фонда по компенсации потерь и ущерба, вызванных последствиями изменения климата, а также COP28, где было достигнуто глобальное соглашение о скорейшем и справедливом переходе от ископаемого топлива в энергетических системах, увеличении в три раза объема возобновляемых источников энергии и укреплении климатической устойчивости.

Необходимо отметить, что по оценкам Международного энергетического агентства, в 2024 году объем глобальных инвестиций в чистую энергетику впервые превысит 2 триллиона долларов США.

2. На COP29 было достигнуто соглашение по углеродным рынкам в рамках Парижского соглашения, которое не удавалось заключить на нескольких предыдущих конференциях по климату. Благодаря этому торговля между странами и механизм углеродного кредитования смогут в полной мере начать функционировать. Решение данной климатической конференции-29 по торговле между странами (Статья 6.2) обеспечивает ясность в отношении того, как страны будут авторизовывать торговлю углеродными кредитами, и как будут действовать рестры, в которых это будет отражено. Кроме того, появилось понимание того, что будет обеспечен изначальный учет экологических факторов благодаря проведению технических проверок в рамках прозрачного процесса. Это позволит странам привлекать финансирование, компенсировать выбросы или торговать ими на бирже. Соответствующие соглашения помогут странам быстрее и с меньшими финансовыми затратами реализовать свои климатические планы и быстрее добиться прогресса в сокращении глобальных выбросов в два раза уже в этом десятилетии, как того требуют результаты научных исследований.

3. Саммит в Баку стал важной вехой для адаптации к климатическим изменениям, поскольку на нем было достигнуто несколько ключевых результатов на данном направлении. Решение COP29 по вопросам, касающимся наименее развитых стран, содержит положение о создании программы поддержки для осуществления Национальных планов по адаптации (НПА) для наименее развитых стран. В ходе Диалога высокого уровня по НПА министры из наименее развитых стран и малых островных развивающихся государств, финансовые эксперты и международные доноры встретились для преодоления становящейся все более неотложной проблемы адаптации к изменению климата. В ходе дискуссий обсуждались вопросы инновационного финансирования, технической поддержки и ускорения принятия мер для соблюдения сроков представления НПА к 2025 году. Мероприятие завершилось призывом к принятию мер по ускорению подготовки НПА и воплощению планов в практические результаты. Результат по Глобальной цели по адаптации прочертил четкую дорогу вперед на пути к COP30 для рабочей программы по индикаторам, подготовив процесс, в ходе которого эксперты смогут продолжить свою техническую работу до «передачи эстафеты» Сторонам [3]. На COP29 также была запущена Бакинская дорожная карта по адаптации и Бакинский диалог высокого уровня по адаптации с целью укрепить осуществление Рамочной программы ОАЭ 2023 г.

4. На COP29 был сделан также решительный шаг вперед для повышения роли коренных народов и местных общин в мерах по борьбе с изменением климата.

Был принят Бакинский рабочий план и продлен мандат Рабочей группы по содействию Платформы местных общин и коренных народов. Эти меры подчеркивают необходимость более активного вовлечения местных сообществ и коренных народов в глобальные процессы адаптации и борьбы с изменением климата. Их знания и опыт в области природопользования признаны важным ресурсом, который необходимо интегрировать в национальные планы по адаптации[4].

3 Россия – на пути к углеродной нейтральности

После подписания Россией Парижского соглашения по климату в 2016 г. перед научным сообществом встал вопрос о необходимости оценки потоков парниковых газов от всех экосистем России. Обсуждался запрос о возможности представления в кадастре отчетности по всем экосистемам. В определенных кругах получила распространение идея о климатическом «донорстве» России и, как следствие, об отсутствии необходимости в сокращении антропогенных выбросов парниковых газов. Минприроды России заказало соответствующую научно-исследовательскую работу в 2017 году коллективу ученых, в который вошли ведущие ученые МГУ, институтов РАН (ИГ РАН, ИФХиБПП РАН, ИЛАН РАН) и Росгидромета (ИГКЭ).

Результаты проведенных исследований были опубликованы в 2023 г. в монографии под редакцией директора института Глобального климата и Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ФГБУ ИГКЭ) члена-корр. РАН А.А. Романовской [5]. Эта монография является первым опытом комплексной оценки баланса всех основных парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) на территории России методом «снизу-вверх», т.е. на основе наземных экспериментальных данных, методов математического моделирования и расчетной оценки в соответствии с международно-признанными методиками МГЭИК. В ней обобщены данные по чистому (нетто) поглощению/выбросам парниковых газов по различным типам природных экосистем субъектов РФ.

Согласно представленным расчетам, часть природных экосистем Российской Федерации выступает в качестве чистого поглотителя парниковых газов. К таким экосистемам относятся леса, степи и болота, которые обеспечивали нетто-поглощение в количестве 775,2, 420,3 и 119,2 млн тонн CO₂-экв. в год, соответственно. Также в ИГКЭ были получены результаты, показывающие, что другая часть природных экосистем Российской Федерации выступает в качестве нетто-источника парниковых газов. К ним относятся тундры, луга и пресноводные экосистемы, которые эмитировали 64,7, 61,8 и 151,7 млн тонн CO₂-экв. в год, соответственно. В целом, по расчетам, представленным в данной монографии, природные экосистемы РФ выступают нетто-поглотителями парниковых газов в количестве 1036,4 млн тонн CO₂-экв. в год. Именно это значение поглощения парниковых газов природными экосистемами на территории России и было озвучено М. Мишустинным на климатическом саммите COP29. Рис.1 наглядно иллюстрирует вклад природных экосистем России в поглощение и выброс парниковых газов.

Зеленые столбцы представляют экосистемы-поглотители (леса, степи, болота), а красные столбцы — экосистемы-источники выбросов (тундры, луга, пресноводные экосистемы). Линия с аннотацией отмечает общий результат поглощения (+1036,4 млн тонн CO₂-экв. в год) всеми экосистемами России. Разработки других научных коллективов по проблематике поглотительной способности углекислого газа лесными экосистемами России и их современной и перспективной роли в достижении углеродной нейтральности страны подробно рассмотрены в статье акад. РАН В.В.Клименко с соавторами [6].

Текущая климатическая цель и международные обязательства России сформулированы следующим образом: «обеспечить к 2030 году сокращение объема выбросов ПГ до 70% относительно уровня 1990 года с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития» [7]. Дальнейшая политика низкоуглеродного развития экономики страны была представлена в «Стратегии социально-экономического развития с низким выбросом парниковых газов на период до 2050 г.» [8].

Важно отметить, что принятый в 2021 году Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов» ввел в России обязательную отчетность с 2023 г. о выбросах ПГ для крупнейших компаний-эмитентов и создал возможности для реализации климатических проектов [9].

В России в феврале 2022 г. по указу Президента утверждена Федеральная программа в области экологического развития и климатических изменений до 2030 года, которая подразумевает разработку системы мониторинга потоков ПГ и углеродного цикла [10].

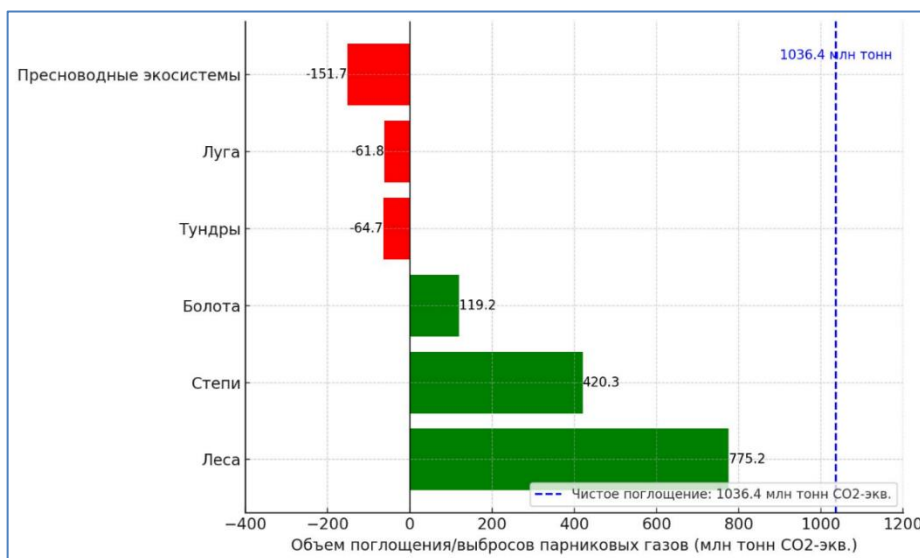


Рис. 1. Поглощение и выброс парниковых газов природными экосистемами России (млн тонн CO₂-экв. в год, составлено авторами по данным [5])

Для реализации Стратегии развития с низким выбросом парниковых газов [8] требуется соответствующее аналитическое сопровождение. Для этого правительство сформировало и финансирует важнейший инновационный проект государственного значения (ВИП ГЗ) по созданию системы мониторинга климатически активных веществ. Куратором проекта является Минэкономразвития. Этот проект реализуется 50 различными институтами Российской академии наук, Росгидромета и университетами. Его задача заключается в том, чтобы со всех сторон обеспечить процесс выработки решений в области климатической политики: и со стороны экономики, и со стороны экосистем, и со стороны мониторинга глобального изменения климата. Система позволит повысить качество мер по декарбонизации и связать их с решениями, принимаемыми не только в области климата, но и по развитию всей российской экономики [11].

Для разработки системы мониторинга было принято решение о создании Карбоновых полигонов на территории России для оценки потоков парниковых газов в природных экосистемах страны. Этот пилотный проект, реализуемый Минобрнауки России, представляет собой интересное и перспективное направление климатической политики России. Он позволит не только внести вклад в формирование надежной национальной системы мониторинга потоков парниковых газов в экосистемах России, но и увеличить доверие к российским климатическим проектам. В конце августа 2022 г. четыре российских научно-образовательных центра мирового уровня (НОЦ) и восемь университетов подписали соглашение о развитии инициатив по обучению, исследованиям и прикладным разработкам в области климатических проектов и снижению воздействия на климат и окружающую среду.



Рис. 2.Схема размещения карбоновых полигонов при организациях Минобрнауки России, [12]

Исследования на карбоновых полигонах России (Рис.2) должны внести вклад в формирование надежной национальной системы мониторинга потоков парниковых газов (ПГ) в экосистемах страны и углеродного цикла. Они будут способствовать поиску, разработке и внедрению экономически и климатически эффективных технологий поглощения (секвестрации) атмосферного углерода природными экосистемами России с учетом различных почвенных и климатических условий, типа растительности, рельефа местности, видов землепользования и других факторов [12].

4 Заключение

Климатический саммит COP29 подтвердил необходимость ускоренных мер по борьбе с изменением климата и адаптации к его последствиям. Ключевым итогом стало согласование новой цели по климатическому финансированию — увеличению объемов поддержки развивающихся стран до 1,3 трлн долларов США к 2035 году. Это решение должно ускорить переход к устойчивой энергетике, хотя вызвало обеспокоенность из-за длительности переходного периода.

Значимым шагом стало соглашение по углеродным рынкам, которое создаёт возможности для торговли углеродными квотами и компенсации выбросов, что упрощает реализацию климатических инициатив. Доработка вопросов прозрачности и структуры реестров требует дальнейших переговоров и согласований на последующих саммитах.

Особое внимание на COP29 уделено защите прав коренных народов и уязвимых групп. Приняты Бакинский рабочий план и решения по поддержке национальных планов адаптации, что усиливает вовлечение местных сообществ в глобальные климатические процессы.

Россия подтвердила приверженность принципам РКИК ООН и Парижского соглашения, подчеркнув необходимость справедливого распределения климатической ответственности. Российская Федерация настаивает на соблюдении принципа «общей, но дифференцированной ответственности», согласно которому развитые страны должны выполнять свои обязательства по финансированию климатических мер, а развивающимся странам следует предоставлять возможность вносить вклад на добровольной основе.

В итоговых документах Конференции делегации от России также удалось не допустить пересмотра договоренностей прошлого года и отстоять важность использования переходного топлива - газа, самого низкоуглеродного из ископаемых видов топлива. Это важно для всех развивающихся стран, чтобы они могли обеспечить достаточный для экономики объем энергии по доступной цене

В российской энергетической политике упор делается на повышение энергетической эффективности, развитие электротранспорта, внедрение современных решений в сельское и лесное хозяйство. В России уже 85% энергобаланса обеспечивается чистой, низкоэмиссионной генерацией. Учитывая значительные площади лесных массивов и других природных экосистем в стране в рамках клима-

тической стратегии России большое внимание уделяется расширению возможностей по учету объемов поглощения углекислого газа природными экосистемами, такими как леса, степи и болота, что становится важным элементом при определении выполнения национальных обязательств (NDCs) в рамках Парижского соглашения.

Природные экосистемы России играют ключевую роль в поглощении парниковых газов, что позволяет укреплять её климатическую позицию на международной арене. Леса, болота и степи выступают основными поглотителями парниковых газов, способствуя ежегодному нетто-поглощению более 1 млрд тонн CO₂-эквивалента. На COP29 российская делегация подчеркнула важность учёта вклада экосистем в национальные цели по снижению выбросов. Карбоновые полигоны, созданные в России, будут способствовать усилению аналитического и научного потенциала страны в этой области. Благодаря карбоновым полигонам, Россия сможет более точно учитывать объемы поглощения углекислого газа своими природными экосистемами, что станет ключевым фактором в международных переговорах по учету национальных вкладов в рамках Парижского соглашения.

Дальнейшее развитие климатической политики требует от России активного взаимодействия с международными организациями и другими странами-участниками РККК ООН. Прогресс в создании национальной системы мониторинга парниковых газов, разработка углеродных полигонов и принятие мер по декарбонизации промышленности позволят России не только выполнить свои международные обязательства, но и укрепить свою позицию на мировой арене в качестве лидера по борьбе с изменением климата.

Благодарность

Работа выполнена в рамках Госзадания № 121051400082-4 и при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № FMWE-2024-0017)

Литература

1. Официальный сайт Еврокомиссии https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/climate-action-and-green-deal/eu-un-climate-change-conference_en
2. Официальный сайт Правительства РФ <http://government.ru/news/53292/>
3. Официальный сайт Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. <https://unfccc.int/news/cop29-un-climate-conference-agrees-to-triple-finance-to-developing-countries-protecting-lives-and>
4. Официальный сайт Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. <https://unfccc.int/news/cop29-adopts-baku-workplan-to-elevate-voices-of-indigenous-peoples-and-local-communities-in-climate>

5. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации. / Под редакцией чл.-корр. РАН А.А. Романовской. Москва: ИГКЭ, ООО «Принт», 2023. 346 с.
6. Дорога к климатической нейтральности: через леса под землю. Клименко В., Клименко А., Терешин А., Локтионов О. // Энергетическая политика. 2023. № 7 (185). С. 8-25.
7. Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 N 666 «О сокращении выбросов парниковых газов»
8. Стратегия социально-экономического развития с низким выбросом парниковых газов, на период до 2050 г. Распоряжение Правительства России № 3052-р от 29 октября 2021 г.
9. Федеральный закон от 02.07.2021 N 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»
10. Постановление Правительства Российской Федерации от 08.02.2022 N 133 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы»
11. Интервью с директором Института Народного хозяйственного прогнозирования А.А.Шировым. Информация с портала «Научная Россия» <https://scientificrussia.ru/articles/klimaticheskaya-politika-ekonomicheskoe-reseniye-intervyu-s-direktorom-inp-ran-aleksandrom-sirovym>
12. Официальный сайт Министерства образования и науки РФ <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/57285/>

References

1. Official website of the European Commission https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/climate-action-and-green-deal/eu-un-climate-change-conference_en
2. Official website of the Government of the Russian Federation <http://government.ru/news/53292/>
3. Official website of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) <https://unfccc.int/news/cop29-un-climate-conference-agrees-to-triple-finance-to-developing-countries-protecting-lives-and>
4. Official website of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) <https://unfccc.int/news/cop29-adopts-baku-workplan-to-elevate-voices-of-indigenous-peoples-and-local-communities-in-climate>
5. Assessment of greenhouse gas flows in the ecosystems of the regions of the Russian Federation. / Edited by Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences A.A. Romanovskaya. Moscow: IGCE, Print LLC, 2023. 346 p.
6. The road to climate neutrality: through forests underground. Klimenko V., Klimenko A., Tereshin A., Loktionov O. // Energy Policy. 2023. No. 7 (185), pp. 8-25.
7. Decree of the President of the Russian Federation dated November 4, 2020, No. 666 "On the Reduction of Greenhouse Gas Emissions".
8. Strategy for socio-economic development with low greenhouse gas emissions for the period up to 2050. Order of the Government of Russia No. 3052-r dated October 29, 2021.
9. Federal Law of July 2, 2021, No. 296-FZ "On the Limitation of Greenhouse Gas Emissions".

10. Resolution of the Government of the Russian Federation dated February 8, 2022, No. 133 "On the Approval of the Federal Scientific and Technical Program in the Field of Environmental Development of the Russian Federation and Climate Change for 2021–2030".
11. Interview with the Director of the Institute of Economic Forecasting A.A. Shirov. Information from the Scientific Russia portal <https://scientificrussia.ru/articles/klimaticeskaapolitika-ekonomiceskoe-resenie-intervu-s-direktorom-inp-ran-aleksandrom-sirovym>
12. Official website of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/57285/>

The Position of Russia at the COP29 Climate Summit and the Role of Natural Ecosystems in the Country's Greenhouse Gas Balance

^{1,1}Liudmila Nefedova,^{2,2}Dmitry Solovyev

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,
² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: ¹ nefludmila@mail.ru, ² solovev@ocean.ru

Abstract. The article presents an overview of the main issues and decisions discussed at the international climate change conference in Baku in November 2024. It outlines Russia's position on the financing of measures to reduce anthropogenic impact, mitigation, and adaptation of least developed countries to global climate change. The article provides a detailed analysis of the assessment of carbon dioxide emissions and absorption parameters by natural ecosystems within Russia's low-carbon development strategy.

Keywords: carbon dioxide emissions, climate change, adaptation, CO2 absorption by forests, international financing.

Acknowledgements

This work was supported by the State Assignment No.121051400082-4 and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. FMWE-2024-0017).

УДК 621.3:621.22:620.91

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-4-16-33

EDN: PXVYCT

Парусные ветроэнергетические установки: уменьшение потерь мощности при циклическом движении платформ

¹ Чекарев Константин Владимирович ^[0000-0002-5140-5142],
² Залиханов Алим Михайлович ^[0000-0002-2540-6045]

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

E-mail: ¹konstantintchekarev@yandex.ru, ²bulungu@yandex.ru

Аннотация. Ветроэнергетические установки большой мощности, преобразующие кинетическую энергию ветра в электроэнергию, из-за низкой плотности воздуха имеют значительные размеры, что приводит к необходимости сооружать большие конструкции при использовании в установках ветроколеса с горизонтальной осью вращения. Предложен вариант парусной энергетической установки наземного базирования, в которой проблема, связанная с большими вертикальными размерами преобразователей энергии ветра, снимается. Установка содержит платформы с системой жестких парусов, которые движутся циклически в заданном интервале перемещений. Чтобы уменьшить потери мощности при изменении направления движения платформ, была введена система изменения скорости платформ, содержащая пружины, расположенные на концах интервала перемещений, и пружину, установленную между платформами. Были проведены исследования на макетах платформ, которые двигались в автоматическом режиме по эстакаде с системой изменения скорости платформ. Исследования проводились при движении по эстакаде одной и двух платформ. Результаты проведенных исследований представлены в данной статье.

Ключевые слова: ветроэнергетика, возобновляемые источники энергии, ветровая установка, парусная энергетическая установка, жесткие паруса.

1 Введение

Использование кинетической энергии ветра в хозяйственной деятельности человека насчитывает несколько тысячелетий. Преобразователи энергии ветра в виде ветроколеса использовались только на суше для совершения работы, а преобразователи ветровой энергии в виде паруса использовались в основном на воде для перемещения транспортных средств. Известны примеры использования парусов для перемещения транспортных средств на суше в Древнем Египте, Китае и др. [1], но это направление развития не получило. В настоящее время перемещение объектов по земле с помощью парусов осуществляется только в спортивных целях. Создана ассоциация World Sailing, которая проводит соревнования сухопутных парусных яхт, фиксирует рекорды скорости парусных болидов [2,3].

С появлением «зеленой» энергетики, установки с преобразователем энергии в виде ветроколеса стали широко использоваться для производства электроэнергии. Они устанавливаются на суше, вблизи морского берега и на море. Ветроэнергетика является одной из самых быстроразвивающихся отраслей возобновляемой энергетики. В отчете The Global Wind Report от 2024 года отмечается, что по суммарной введенной мощности - 117 ГВт, 2023 год был рекордным в глобальной ветроэнергетике [4]. В большинстве действующих ветровых установок преобразование энергии ветрового потока в электричество осуществляется с помощью ветроколеса с горизонтальной осью вращения и соединенного с ним электрогенератора, которые устанавливаются на мачте. В установках большой мощности диаметр ветроколеса может превышать величину 100 метров. Для удержания ветроколеса таких размеров необходима прочная конструкция и соответствующий грунт, чтобы выдерживать большой вес установки и ветровые нагрузки. Однако существует много территорий с высоким ветровым потенциалом, в которых, из-за свойств грунтов (обводненные, сезонно промерзающие, песчаные и др. грунты), соорудить такие установки либо нельзя, либо экономически нецелесообразно. Одним из вариантов решения задачи использования ветроэнергетических установок в таких районах могут быть парусные энергетические установки наземного базирования.

2 Актуальность исследования и постановка цели

Предлагаются варианты парусных энергетических установок наземного базирования, позволяющих снять проблему больших размеров преобразователя энергии ветрового потока. Известен вариант конструкции парусной энергетической установки наземного базирования, содержащей платформы, соединенные в замкнутый состав, который движется по радиальному рельсовому пути [5]. На платформах установлена система парусов, которые меняют положение в зависимости от направления ветра и участка пути. Электроэнергия вырабатывается с помощью электрогенераторов, соединенных с колесами платформ. Недостатком

предлагаемой конструкции является низкая эффективность, поскольку на половине пути платформы перемещаются под острым углом к направлению ветра.

Эффективность парусной энергетической установки наземного базирования можно повысить, если состав платформ сделать незамкнутым и изменить характер движения платформ. Предложен вариант парусной энергетической установки, в которой платформы движутся циклично в заданном интервале перемещений перпендикулярно направлению ветра [6]. Изменение направления движения в конце интервала перемещений в такой установке осуществлялось с помощью системы изменения положения парусов. На концах интервала перемещений паруса изменяют положение и платформы начинают двигаться в противоположную сторону.

Была создана экспериментальная установка для проведения исследований на макетах парусных платформ. Целью исследований было проверка функционирования входящих в установку систем и разработка методик определения технических характеристик ветроэнергетической установки. В процессе проведения экспериментов выяснилось, что для получения точных значений технических характеристик, поверхность, по которой движется платформа, должна обладать рядом свойств: она должна быть ровной и строго горизонтальной. Эти условия могут быть выполнены, если платформа будет двигаться по эстакаде. Эксперименты с движением платформ по эстакаде были предусмотрены программой исследований, поскольку предполагалось, что парусные энергетические системы могут быть использованы в тех районах, в которых платформы не могут двигаться по земле, например, в районах вечной мерзлоты. Были созданы две эстакады, на которых были проведены эксперименты по определению величины сил, действующих на платформы [7], по определению коэффициента эффективности преобразования энергии ветрового потока [8], а также эксперименты по увеличению мощности ветроэнергетической установки наземного базирования [9].

Для повышения эффективности преобразования энергии ветрового потока на платформах была установлена система жестких парусов, выполненная в виде вертикальной рамки, в которую вставлялся набор из жестких пластин. Известно, что устанавливаемые на морских судах жесткие паруса оказываются более эффективными по сравнению с традиционными парусами [10]. Жесткие паруса были установлены на сухопутных яхтах для достижения рекордных скоростей в 209 км/ час и 222 км/час [11]. Последний рекорд был поставлен в декабре 2022 года чемпионом яхтенной гонки Кубок Америки 2021 года [12]. Для определения эффективности функционирования системы жестких парусов были проведены эксперименты по определению технических характеристик, таких как скорость платформ при разном количестве пластин в системе жестких парусов [13], величина действующих на платформу сил и определение коэффициента эффективности преобразования энергии ветрового потока.

Однако при циклическом движении платформ, при котором изменение направления их движения осуществляется за счет сил, действующих на паруса платформ, происходит потеря мощности установки, поскольку платформы должны остановиться, а затем вновь набрать скорость в обратном направлении. Изменение скорости платформ осуществляется за счет аэродинамических сил,

действующих на паруса, на что требуется значительный временной интервал. Этот временной интервал, а вместе с ним и потери мощности установки, можно значительно уменьшить, если ввести в установку систему изменения скорости платформ, содержащую пружины, расположенные на концах интервала перемещений, и пружины между платформами, если в установке содержится несколько платформ. В этом случае остановка платформ будет происходить за счет сил сжатия пружин, при этом кинетическая энергия платформы будет переходить в энергию сжатия пружин. После остановки платформы будут набирать скорость за счет сил, действующих как со стороны пружины, а также со стороны аэродинамической силы ветрового потока, действующего на паруса, в результате изменение скорости платформ будет осуществляться значительно быстрее. При движении двух и большего количества платформ с пружинами, установленными между ними для уменьшения нагрузки на пружины в конце эстакады, необходимо разработать механизм устранения колебаний платформ, которые могут возникнуть после изменения направления движения платформ.

3 Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Экспериментальная установка включала следующие элементы: генератор ветрового потока (ГВП), макеты платформ, на которых была установлена система жестких парусов, системы изменения положения жестких парусов, систему автоматического управления движением платформ и систему изменения скорости платформ. Изображение генератора ветрового потока и эстакады представлено на Рис.1.



Рис. 1. Генератор ветрового потока и эстакады для движения платформ

Поверхности для движения платформ по эстакаде были выполнены из прямоугольных пластиковых профилей размером 25 x 16 мм, расположенных на расстоянии 145 мм друг от друга и отстоящих от горизонтальной плоскости на расстоянии 160 мм. В середине эстакады был расположен направляющий рельс, выполненный из квадратного пластикового профиля размером 12 x 12 мм, на котором была нанесена разметка с интервалом 10 см. Направляющий рельс эстакады отстоял от генератора ветрового потока на расстоянии 50 см. Генератор ветрового потока (ГВП) был выполнен в виде двух рядов вытяжных электрических вентиляторов в количестве 13 и 12 штук в нижнем и верхнем ряду соответственно. Вентиляторы были расположены рядом друг с другом на рейках длиной 2 метра, разнесённых по вертикали на 8 см. Рейки крепились на двух стойках, высота которых подбиралась экспериментально таким образом, чтобы паруса оказывались в области равномерного распределения скоростей в вертикальных плоскостях. График распределения скоростей ветрового потока в вертикальных плоскостях, отстоящих от ГВП на расстоянии 50 см и 70 см, представлен на Рис.2.

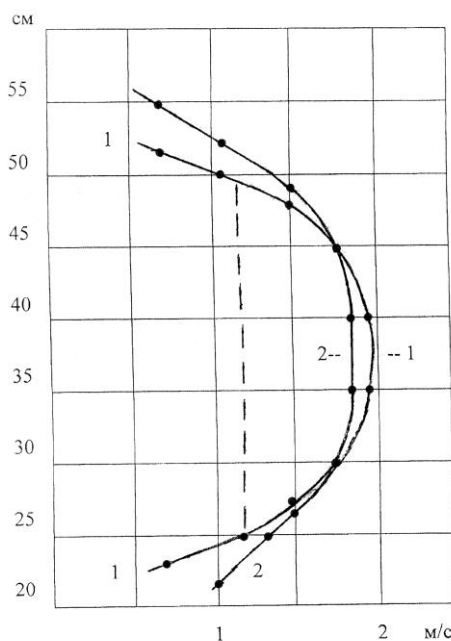


Рис. 2. Распределение скоростей ветрового потока в вертикальных плоскостях, отстоящих от генератора ветрового потока на расстояниях 50 и 70 см. (графики на рисунке: 1 – 50 см; 2 – 70 см; пунктирная линия - положение пластин системы жестких парусов)

Экспериментальные исследования проводились на макетах платформ, на которых были установлены системы жестких парусов с набором из 4 полос. Изображение макетов платформ с системой жестких парусов представлено на Рис. 3.

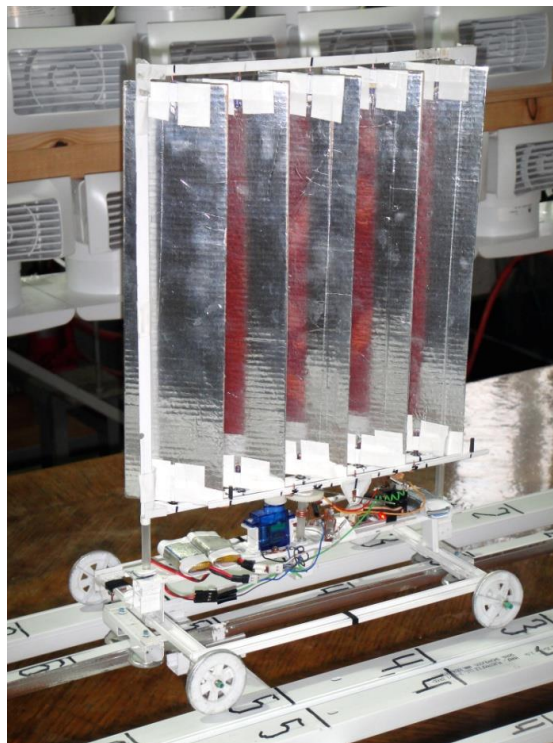


Рис. 3. Макет платформы с системой жестких парусов

К рамке основания платформы прямоугольной формы размером 22 см x 17 см, крепились 4 пластмассовых колеса диаметром 40 мм. В середине платформы, на расстоянии 3 см по высоте, крепилась рейка длиной 24 см, на которой устанавливалась система жестких парусов, выполненная в виде двух вертикальных пластиковых трубок диаметром 5 мм и высотой 30 см, отстоящих друг от друга на расстоянии 22 см. К трубкам крепилась прямоугольная рамка шириной 22 см и высотой 26 см, сделанная из тонкого пластикового уголка размером 6x6 мм. Нижняя сторона рамки находилась на расстоянии 10 см от поверхности, по которой двигалась платформа. В рамку был вставлен набор из 4-х жестких полос шириной 7,5 см и высотой 25,5 см, отстоящих друг от друга на расстоянии 6 см. Полосы вырезались из листа пенополистирола толщиной 3 мм. Полосы крепились к нижней и верхней стороне рамки так, чтобы они могли поворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через середину полос. Поворот полос на заданный угол осуществлялся с помощью системы изменения положения жестких парусов, включавшей небольшой мотор с редуктором, на оси которого

была закреплена шестеренка, связанная с шестеренкой большого диаметра, закреплённой на вертикальной трубке диаметром 5 мм, в которую был вставлен горизонтальный рычаг. При вращении шестеренки мотора, трубка с закреплённым на рычагом поворачивалась на угол $\pm 90^\circ$, при этом с помощью рычага все установленные в рамке полосы также поворачивались одновременно на угол $\pm 90^\circ$. Поворот осуществлялся с помощью тонкой рейки, прикреплённой к нижнему углу каждой полосы подвижным соединением. При повороте рычага на угол $\pm 90^\circ$ рейка перемещалась вправо или влево, поворачивая все полосы на угол $\pm 90^\circ$.

Траектория движения платформы задавалась направляющей системой, которая включала расположенный на середине эстакады направляющий рельс и 4 колеса диаметром 15 мм, закреплённых по 2 на коротких сторонах рамки основания платформы. Их оси были направлены вертикально, находились на расстоянии 32 мм и были установлены так, чтобы направляющий рельс находился между ними. При таком расположении колес платформа свободно перемещалась вдоль направляющего рельса.

Система автоматического изменения направления движения платформ включала направляющий рельс, который использовался как контактный рельс, на вертикальные стороны которого с двух сторон наклеивалась алюминиевая лента. С одной стороны контактного рельса лента была сплошной, а с другой стороны алюминиевая лента была наклеена только на его концах. К алюминиевым лентам были подключены два аккумулятора напряжением 3,7 В. Схема подключения аккумуляторов представлена на Рис.4. Для электрического контакта системы изменения положения жестких парусов с контактным рельсом, на одной из сторон рамки платформы, дополнительно к двум направляющим колесам, крепились два металлических колеса с вертикальной осью вращения, расположенные по высоте так, чтобы они касались середин вертикальных сторон контактного рельса. Колеса прижимались к контактному рельсу петлей из тонкой резины. Контактные колеса были соединены проводами с электромотором системы изменения положения жестких парусов. На концах эстакады через контактные колеса и алюминиевые ленты на электромотор системы изменения положения жестких парусов подавались сигналы разной полярности и паруса поворачивались в одну или другую сторону.

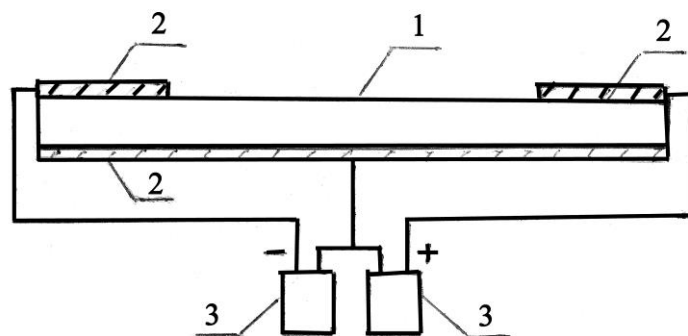


Рис.4. Схема подключения аккумулятора с алюминиевыми лентами на контактном рельсе. (1 - контактный рельс; 2 - алюминиевая лента; 3 - аккумулятор 3,7V)

Система изменения скорости платформ включала пружины, установленные на концах эстакад над направляющим рельсом, как это показано на Рис.5.

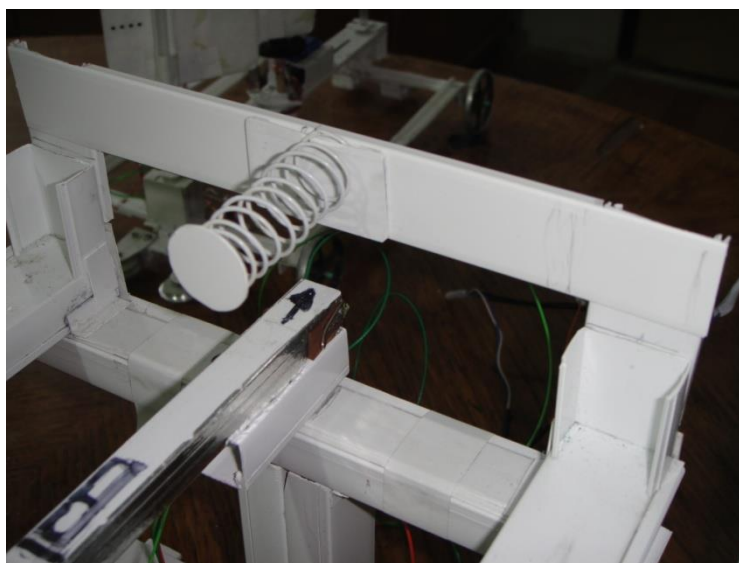


Рис.5. Система изменения скорости платформ, установленная на конце эстакады

Для контакта платформы с пружиной на обоих концах платформы приклеивалась вертикальная квадратная пластина размером 25 мм. При движении двух платформ, для уменьшения нагрузки на пружины на концах эстакады, между платформами устанавливалась пружина. Для устранения колебаний платформ, которые, как показали предварительные эксперименты, неизбежно возникают после взаимодействия платформ с пружинами на концах эстакады, был разработан простейший механизм их устранения. Для этого пружина крепилась к двум платформам, а сами платформы связывались друг с другом нитью так, чтобы нить была натянута, а пружина не была сжата. Такая организация крепления пружины препятствует растяжению пружины между платформами после того, как передняя по ходу платформа, после взаимодействия с пружиной на конце эстакады, сообщает соединенной с ней платформе дополнительный импульс, который вызывает колебания платформ, если нить отсутствует.

При проведении экспериментов движение платформ снималось на видеорекамеру. По полученным записям строились графики перемещения платформ в зависимости от времени, по которым определялась их скорость и другие характеристики движения.

4 Результаты экспериментов и обсуждение

Были проведены две серии экспериментов. В первой серии исследовалась работа системы изменения скорости платформы с системой жестких парусов при движении одной платформы в автоматическом режиме. Чтобы сравнить эффективность системы изменения скорости платформы были проведены эксперименты с циклическим движением платформы без системы изменения скорости платформ, когда изменение направления движения платформ осуществлялось только за счет аэродинамических сил, действующих на паруса платформы. Для организации такого движения длина алюминиевой ленты на концах эстакады подбиралась так, чтобы платформа изменяла направление движения до соударения с пружиной.

Временной интервал, за который происходит изменение скорости платформы за счет сил пружины легко посчитать. Расстояние x , на которое перемещается пружина при воздействии на неё платформы, определяется из равенства кинетической энергии платформы до взаимодействия с пружиной и энергии сжатой пружины после остановки платформы:

$$mV^2/2 = kx^2/2 \quad (1)$$

где m - масса платформы
 V - скорость платформы
 k - коэффициент упругости пружины

Из выражения (1) определяется величина сжатия пружины x

$$x = V \sqrt{m/k} \quad (2)$$

Временной интервал Δt воздействия сил пружины на платформу находится из выражения

$$F_c \Delta t = \Delta mV \quad (3)$$

где F_c - средняя сила действия пружины на платформу за время взаимодействия $F_c = kx/2$, а $\Delta mV = 2mV$

С учетом выражения (2) для значения x , из выражения (3) получаем формулу для нахождения временного интервала воздействия пружины на платформу

$$\Delta t = 4\sqrt{(m/k)} \quad (4)$$

Эксперименты показали, что система изменения скорости платформы работает эффективно. На Рис.6 приведен график перемещений платформы в зависимости от времени при движении платформы в автоматическом режиме с системой изменения скорости платформы. Как видно из рисунка, скорость платформы при взаимодействии с пружинами, установленными на концах эстакады, изменяется быстро, но при таком масштабе представления определить временной интервал изменения скорости платформы невозможно.

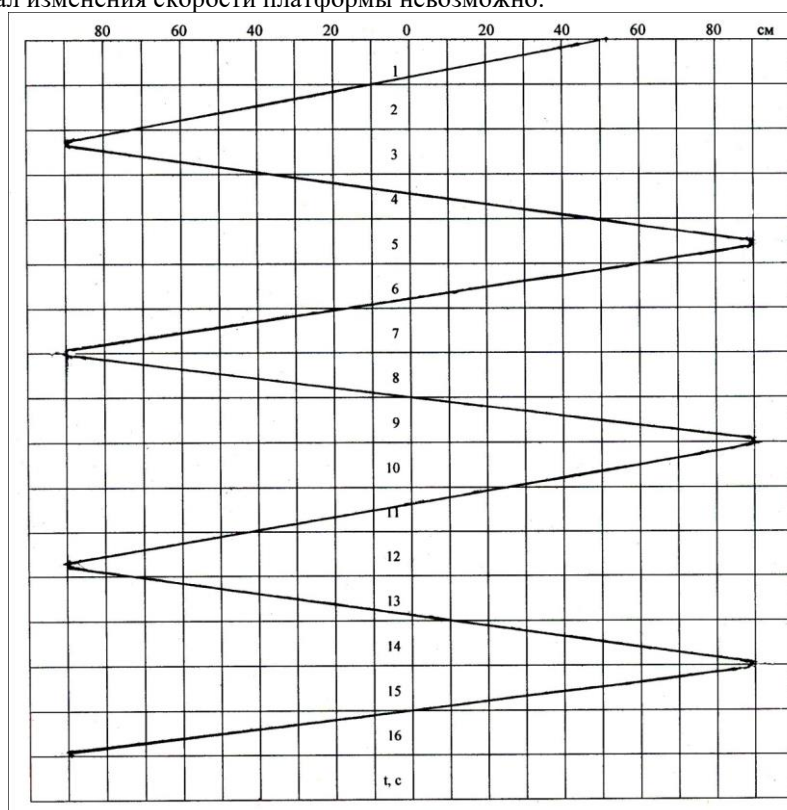


Рис.6. График временной зависимости перемещений платформы с системой жестких парусов из 4-х полос при ее движении в автоматическом режиме по эстакаде с системой изменения скорости

Расчетную величину временного интервала изменения направления движения платформы можно получить, подставляя в выражение (4) значения величины массы платформы $m = 0,2$ кг и коэффициента упругости пружины $k = 100$ н/м.

Для данных значений этих параметров расчетные значения времени изменения скорости платформы при взаимодействии с пружиной равно $\Delta t = 0,18$ с. По записям движения платформы было найдено, что время взаимодействия платформы с пружиной равно $\Delta t = 0,19$ с, что близко к расчетному времени. На Рис. 7 а) приведен график перемещений платформы в увеличенном временном масштабе при изменении направления движения при взаимодействии с пружиной, установленной на эстакаде. Как видно из рисунка, величина временного интервала совпадает, с величиной, полученной другими способами. Перед взаимодействием с пружиной на конце эстакады срабатывала система изменения положения парусов, и они поворачивались на 90° . Момент начала изменения положения парусов обозначен на графике крестиком. Время изменения положения парусов составляет 0,2 с.

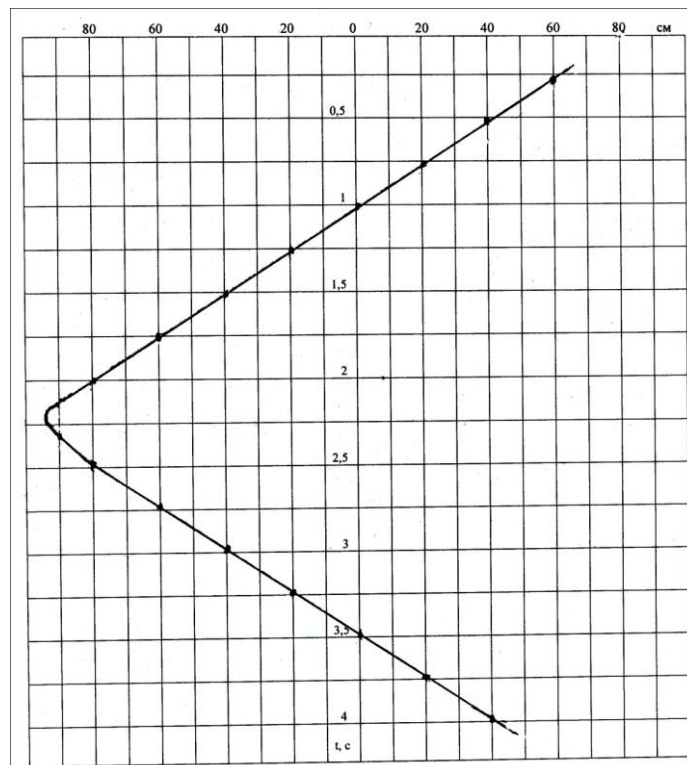


Рис. 7 а). График перемещений платформы с системой жестких парусов из 4-х полюсов в увеличенном временном масштабе при ее движении в автоматическом режиме по эстакаде с системой изменения скорости

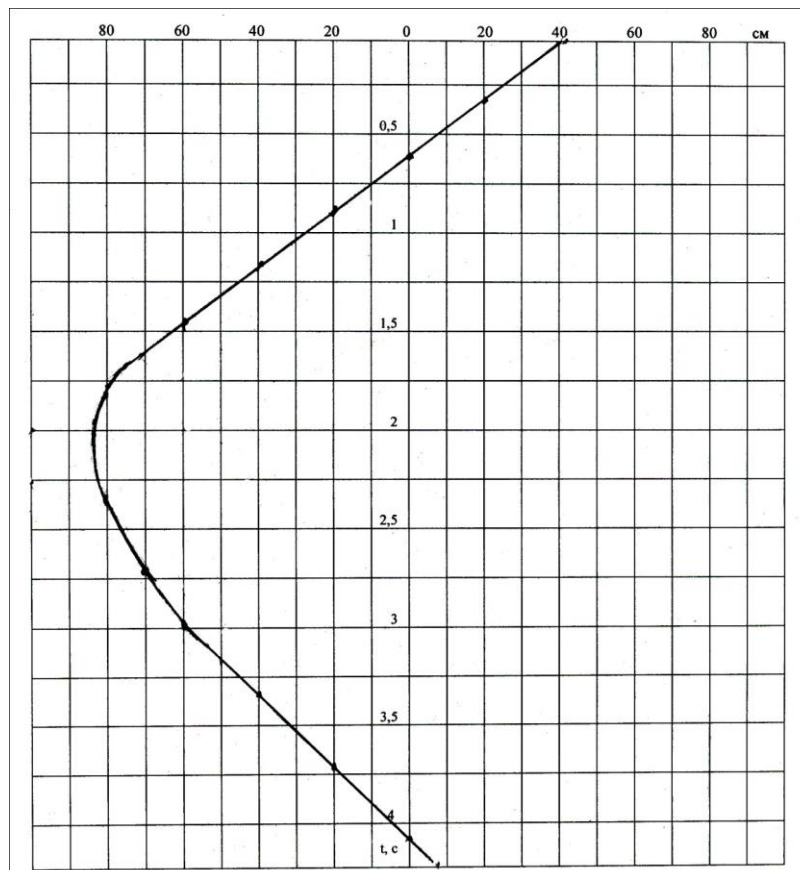


Рис. 7 б). График перемещений платформы с системой жестких парусов из 4-х полос в увеличенном временном масштабе при ее движении в автоматическом режиме по эстакаде без системы изменения скорости

Для сравнения на Рис. 7 б) приведен график изменения направления движения платформы без взаимодействия с пружиной. В этом случае изменение направления движения платформы осуществляется только за счет аэродинамических сил воздушного потока, действующих на паруса платформы при изменении положения парусов. Момент начала изменения положения парусов на графике обозначено крестиком. По графикам положения платформ при изменении направления движения, представленным на Рис. 7 а) и 7 б) можно построить приблизительный график изменения скоростей платформ в зависимости от времени для этих случаев, представленный на Рис 8.

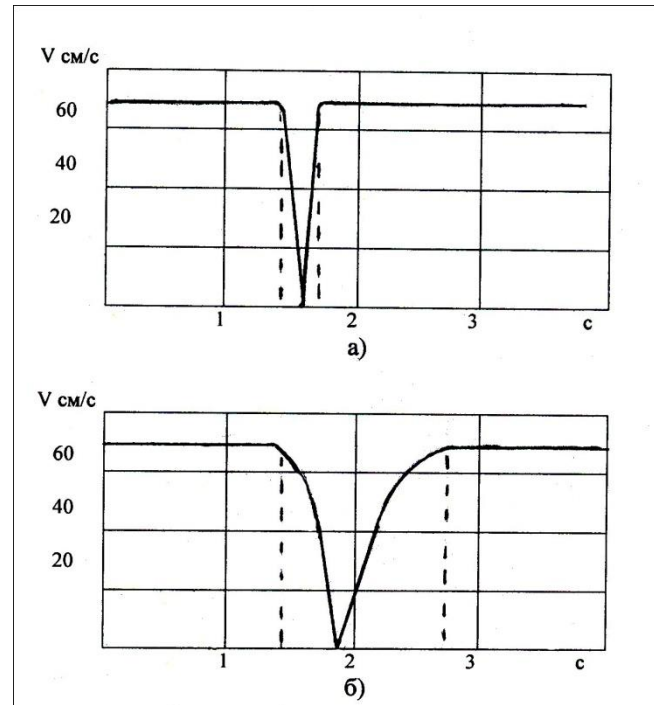


Рис. 8. График временной зависимости скорости платформы по модулю при изменении направления движения: а) – с системой изменения скорости; б) – без системы изменения скорости

Как видно из рисунка, при введении системы изменения скорости временной интервал уменьшается приблизительно в 5 раз. Мощность установки определяется величиной скорости платформы, отсюда следует, что введение в установку системы изменения скорости значительно уменьшает потери мощности при изменении направления движения платформы.

Во второй серии экспериментов проводилось исследование движения двух платформ с установленной между ними пружиной при движении в автоматическом режиме. Как показали исследования, предложенная система устранения колебаний платформ, которые возникают при взаимодействии двух платформ с пружинами на концах эстакад, работает эффективно. После взаимодействия с пружинами колебания платформ полностью исключаются, платформы движутся с одинаковой скоростью. На Рис. 9 представлен график перемещения платформ в зависимости от времени, построенный по видеозаписям второй серии экспериментов. В начальный момент платформы были неподвижными и находились в середине эстакады.

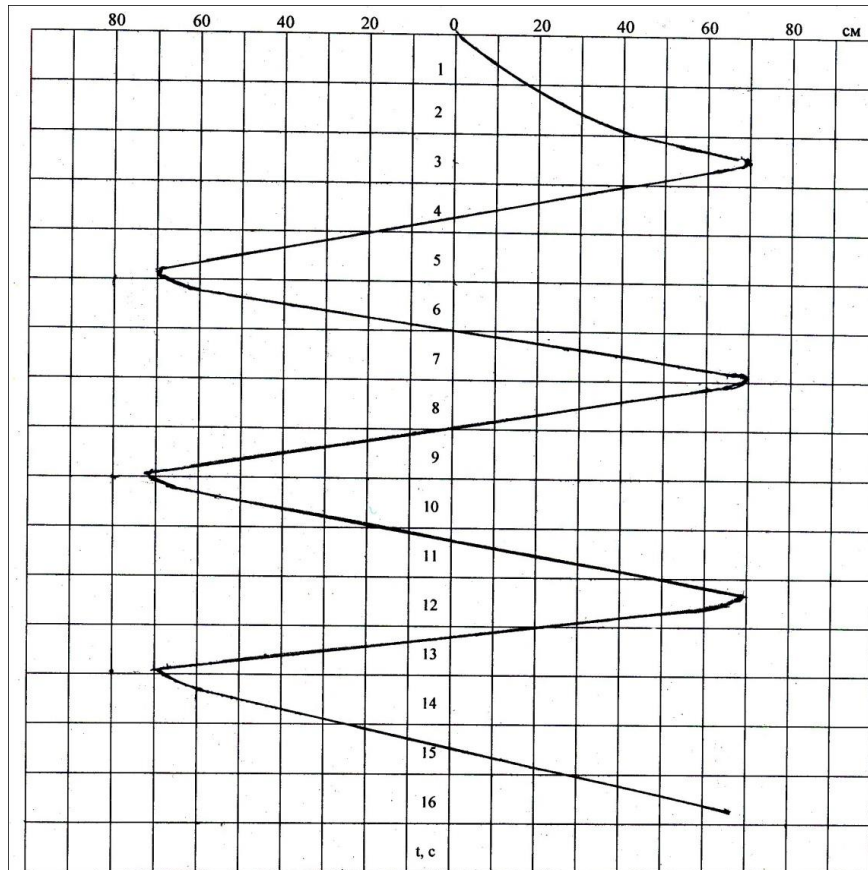


Рис. 9. График временной зависимости перемещений двух платформ с системой жестких парусов из 4-х полос при их движении по эстакаде с системой изменения скорости

Как видно из графика, платформы медленно набирают скорость, но изменение скоростей происходит быстро, при этом скорость между взаимодействиями с пружинами возрастает и стабилизируется после третьего взаимодействия. На Рис. 10 представлен график перемещений платформ при изменении направления движения при взаимодействии с пружинами эстакад, представленный в увеличенном временном масштабе.

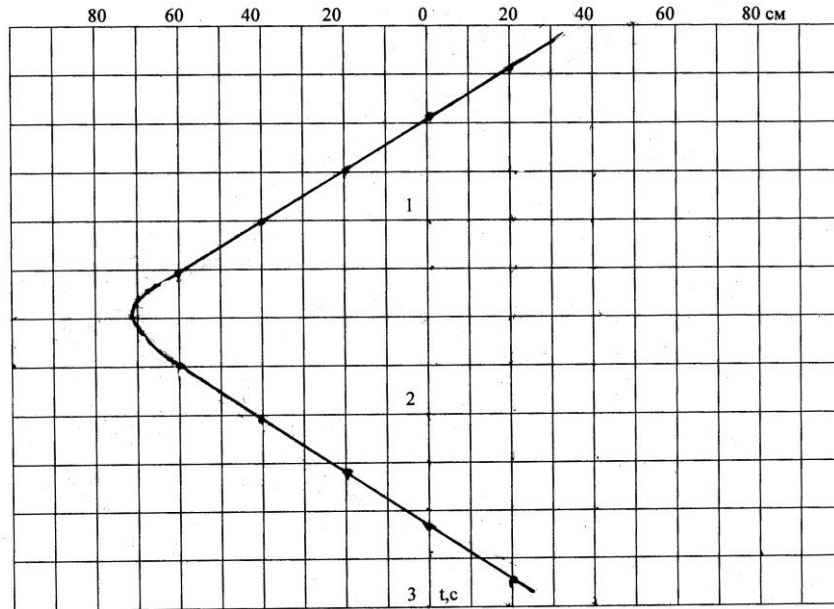


Рис. 10. График перемещений двух платформ в увеличенном временном масштабе при изменении направления движения

Как видно из рисунка, временной интервал изменения скорости платформ оказывается практически таким же, как и при движении одной платформы, перемещение которой представлено на Рис. 7 а)/

5 Заключение

На основании результатов, полученных в процессе проведения экспериментов, можно сделать следующие выводы. Введение системы изменения скорости платформы с помощью пружин, установленных на концах эстакад, существенно сокращает время, в течении которого скорость её равномерного движения изменяется, уменьшает потери мощности, которые возникают при циклическом движении платформ при изменении направлении движения. Сокращение времени изменения скорости при изменении направления движения позволяет сократить интервал перемещений платформы с эффективным использованием энергии ветрового потока. При движении двух и большего количества платформ, установка пружин между платформами позволяет уменьшить нагрузку на пружины, установленные на концах эстакад.

Литература

1. Дигай П. Yacht Russia, № 8 (77), 2015 г. Под парусами по рельсам. https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html
2. Всемирная парусная организация // Event Organiser Resource Centre // <https://www.sailing.org/inside-world-sailing/organisation/>
3. Харрис М. ISAF меняет название на World Sailing. // SPORTCEL // 8.12.2015 г. // <https://www.sailingscuttlebutt.com/2015/12/08/isaf-changes-name-to-world-sailing/>
4. Global Wind Report 2024. URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>
5. Патент № 2125182 РФ, МПК F 03 D 5/04 / Ветроэнергетическая установка; № 96123627/06, заявл. 1996.12.16 / Цыбульников С.И. - заявитель и правообладатель.
6. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования // Окружающая среда и энергосистемы: №2 (14), 2022. С.77-90. <http://jeees.ru/category/journal/2022-2/>
7. Чекарев К. В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: определение величины сил, действующих на платформу // Окружающая среда и энергосистемы. № 3 (15), 2022, сс. 67-79.
8. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: определение коэффициента эффективности // Окружающая среда и энергосистемы: № 4 (16) 2022. <http://jeees.ru/category/journal/2023-4/>
9. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: метод прямого измерения сил, действующих на платформу // Окружающая среда и энергосистемы // № 2 (18), 2023, сс. 49-61. // <http://jeees.ru/category/journal/2023-2/>
10. Нильсен П. Стали ли вингсют-парусники мейнстримом? // Sail. // 2 августа 2017 г. // <https://www.sailmagazine.com/diy/have-wingsails-gone-mainstream>
11. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting // https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf
12. Алексей Носаченко. Болид Hohonuku разогнался до 222,4 километра в час. // <http://motor.ru/news/hohonuku-12-122022.htm> «Алексей Носаченко. Болид Hohonuku разогнался до 222,4 километра в час».
13. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Ветроэнергетическая установка наземного базирования с жесткими парусами // Окружающая среда и энергосистемы. № 1 (21), 2024, с.с. 100-113. <http://jeees.ru/category/journal/2024-1/>

References

1. Digai P. Pod parusami po relsam. // Yacht Russia, # 8 (77), 2015 // https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html/
2. World Sailing Organisation // Event Organiser Resource Centre // <https://www.sailing.org/inside-world-sailing/organisation/>

3. Harris M. ISAF changes name to World Sailing, // SPORTCEL // 8.12.2015 // <https://www.sailingscuttlebutt.com/2015/12/08/isaf-changes-name-to-world-sailing/>
4. Global Wind Report 2024. URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>
5. Patent RU 2125182 C1 / F 03 D 5/04 / Wind-electric Power Plant /Application: # 96123627/06, 16.12.1996 / Tsybul'nikov S.I. - inventor and proprietor //
6. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. №2 (14), 2022. pp.77-90. <http://jееes.ru/category/journal/2022-2/>
7. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: nakhojdenie velichiny sil, deistvuiuschih na platformu // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. №3 (15), 2022. pp.67-79. <http://jееes.ru/category/journal/2022-3/>
8. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: opredelenie koeffitsienta tffektivnosti. // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. № 4 (16) 2022. <http://jееes.ru/category/journal/2023-4/>
9. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: metod priamogo izmerenia sil, deistvuiushih na na platformu. // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. № 2 (18), 2023, pp. 49-61. <http://jееes.ru/category/journal/2023-2/>
10. Nielsen P. // Have Wingsails Gone Mainstream? // Sail Magazine // 2.08/2017 // <https://www.sailmagazine.com/diy/have-wingsails-gone-mainstream/>
11. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting // https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf/
12. <http://motor.ru/news/horonuku-12-122022.htm>«Алексей Носаченко. Болид Horonuru разогнался до 222,4 километра в час»/
13. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M. Vetrotnergeticheskaja ustanovka nazemnogo bazirovania s zhostkimi parusami // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. № 1 (21), 2024, pp. 100-113. <http://jееes.ru/category/journal/2024-1/>

Sailing Wind Power Plants: Reduction of Power Losses during Platform Cycling

¹ Konstantin Chekarev, ² Alim Zalikhanov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: ¹konstantintchekarev@yandex.ru, ²bulungu@yandex.ru

Abstract. High-power wind power plants that convert kinetic wind energy into electricity have significant dimensions due to their low air density, which leads to the need to build large structures when using wind turbines with a horizontal axis of rotation in installations. A variant of a land-based sailing power plant is proposed, in which the problem associated with the large vertical dimensions of wind energy converters is eliminated. The installation contains platforms with a system of rigid sails that move cyclically in a given range of movements. In order to reduce power losses when changing the direction of movement of the platforms, a system for changing the speed of the platforms was introduced, containing springs located at the ends of the travel interval and a spring installed between the platforms. Studies were conducted on mock-ups of platforms that moved automatically along an overpass with a platform speed control system. The research was carried out while moving along the overpass of one and two platforms. The results of the conducted research are presented in this article.

Keywords: windpower, renewable energy sources, wind plant, sailing power plant.

УДК 620.92 : 502.174.3

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-4-34-49

EDN: SLHZM

Децентрализованная электрогенерация на ВИЭ в Республике Саха (Якутия): потенциал, состояние, перспективы

¹ Нефедова Людмила Вениаминовна [0000-0002-6022-0617],² Рафикова Юлия Юрьевна [0000-0003-3204-9135]

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

E-mail: ¹ nefludmila@mail.ru, ² ju.rafikova@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы энергообеспечения зон децентрализованного электроснабжения и климатические особенности Якутии, обуславливающие различия в распределении потенциала гелиоэнергетических и ветроэнергетических ресурсов по территории республики. Показаны тенденции освоения гелиоэнергетических ресурсов в последние годы. Проведен анализ возможностей привлечения ветроэнергоресурсов для обеспечения электроэнергией в Якутии. Данные моделирования производительности ветроустановки KomaiHaltec KWT300 с использованием климатической базы NASA SSE послужили основой для оценок удельного ветроэнергетического потенциала на территории республики. С применением средств ГИС выделены зоны с наиболее высокими значениями коэффициента использования установленной мощности. Для поселков в этой зоне проведены расчеты перспектив автономного электроснабжения исходя из данных по энергопотреблению. При оценках перспективных участков подробно рассмотрены экологические ограничения для использования ветроэнергоустановок (наличие орнитологических территорий) в северной части Якутии. Расчеты позволили выделить 11 населенных пунктов, где использование энергии ветра для энергоснабжения изолированных населенных пунктов на Севере Якутии наиболее перспективно.

Ключевые слова: возобновляемые энергоресурсы, ветроэнергетический потенциал, децентрализованное энергоснабжение, энергопотребление, орнитологические территории.

1 Введение

В республике Саха (Якутия) располагается обширная территория, занятая зоной децентрализованного энергоснабжения. Эта зона охватывает около 40 % территории республики, и ее площадь составляет порядка 1,25 млн кв.км. В зоне децентрализованного энергоснабжения основную роль в обеспечении электроэнергии населенных пунктов играют 126 дизельных электростанций (ДЭС) и газотурбинных установок общей мощностью 199,5 МВт. Ежегодное потребление топлива на ДЭС составляет порядка 250 тыс. тонн дизельного топлива. Особенно остро проблема стоит в северной части региона. Доставка топлива в связи с отсутствием дорог представляет собой сложную задачу. Основная часть грузов идет по Северному морскому пути из Архангельска и Мурманска, затем развивается речным транспортом в короткий навигационный период (так называемый «северный завоз»), стоимость топлива возрастает во много раз. В ряде регионов из-за высокой стоимости доставки топлива себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на ДЭС, поднимается более 150 руб./кВт·ч. Территория Якутии в силу климатических особенности характеризуется достаточно высоким потенциалом возобновляемых источников энергии.

Климатические особенности и ресурсы ВИЭ региона. В зимний период основным барическим образованием, определяющим термический и ветровой режим в Якутии, является Сибирский антициклон. В области высокого давления формируется воздух, характеризующийся чрезвычайной устойчивостью, очень низкими температурами в приземном слое, мощными и продолжительными приземными инверсиями и малой влажностью. Характер облачности и ее количество в холодное и теплое время года значительно различаются. В холодный период при низких температурах воздуха и малом влагосодержании устанавливается устойчивая область высокого давления с нисходящими потоками, уменьшающими влагосодержание. На большей части территории, за исключением арктического побережья, где уровень облачности высокий, в период с декабря по март количество облачности нижнего яруса составляет 5-10%, общей облачности – 40-70%. Таким образом, в зимний период, благодаря ясной погоде и высокой прозрачности атмосферы, несмотря на непродолжительные световые дни, возможно использование гелиоэнергетических ресурсов. Снежный покров в большинстве районов Якутии сохраняется в течение 225-250 дней в году, однако высота вследствие преобладания антициклонической циркуляции невелика, менее 25см на крайнем севере, что не затрудняет использование фотоэлектрических установок. В теплый период года, благодаря высокой температуре, более высокой влажности воздуха, развитию процессов испарения и конвекции и циркуляционным условиям, повторяемость пасмурных дней возрастает до 55-70%. [1-2].

Гелиоэнергетические ресурсы в связи с описанными особенностями климата достаточны для использования на фотоэлектрических установках на значительной части территории республики. Благодаря большой продолжительности светового дня средний приход суммарной радиации на горизонтальную поверхность в три летних месяца составляет даже в северной части Якутии 5,0-5,5 кВт·ч/м² в

сутки, что суммарно за летний период составляет около 40-50% годовой суммы [3].

Ветроэнергетические ресурсы имеют наибольший потенциал использования на северных территориях республики, преимущественно за Полярным кругом. Освоение ветроэнергетических ресурсов начато только вблизи крупного поселка Тикси с населением более 5 тыс. человек, где с 2020 года успешно функционирует ветро-дизельный комплекс (ВЭС 900 кВт – с 2018 г. и ДЭС 3000 кВт – с 2020 г.). Авторами были выполнены расчеты и оценки возможностей привлечения ветроэнергетических ресурсов для энергоснабжения изолированных населенных пунктов в Якутии в северных территориях республики, где использование гелиоэнергетических ресурсов малоэффективно вследствие повышенной облачности и низкого уровня солнечной радиации в осенне-зимний период.

Использование ресурсов малой гидроэнергетики возможно только в центральной и южной зоне Якутии, то есть в районах централизованного энергоснабжения. На севере же республики в связи с суровыми климатическими условиями их использование их целесообразно только в непродолжительный летний период.

2 Состояние и перспективы освоения гелиоэнергетических ресурсов.

Вопрос привлечения солнечных энергетических ресурсов к энергоснабжению удаленных населенных пунктов Республики Саха (Якутия) разрабатывается уже значительный период времени. Высокий потенциал ресурсов солнечной энергии позволил построить РАО ЭС Востока (входит в группу «РусГидро») в период 2012-2018 гг. 20 солнечных электростанций (СЭС) мощностью до 80 кВт (преимущественно 10-20 кВт), суммарной мощностью около 600 кВт. [4]. А также была введена в строй первая в мире крупнейшая СЭС за Полярным кругом мощностью 1 МВт в поселке Батагай в 2015г. Работа данных солнечных электростанций послужила положительным опытом и показала высокую эффективность, в связи чем с 2021г. ПАО «Русгидро» была начата новая программа по созданию СЭС уже большей мощностью в составе автоматизированных гибридных энергетических комплексов (АГЭК) - солнечных электростанций с дизельными электростанциями с системами накопления энергии и управления комплексами. Первый АГЭК был введен в эксплуатацию в 2021 году в Табалахском наслеге Верхоянского улуса. Комплекс состоит из солнечной электростанции мощностью 404 кВт, дизельной электростанции мощностью 600 кВт и системы накопления энергии емкостью 100 кВт/ч. Станцию открыли на Восточном экономическом форуме по телемосту между Владивостоком и Табалахом. Энергокомплекс вырабатывает более 1,34 миллиона кВт.ч в год электроэнергии, обеспечивая надежное энергоснабжение заполярного села Улахан-Кюель населением около 1 тысячи человек. С использованием механизма энергосервисных договоров (ЭСД) в 2021-2022 годах было построено 6 АГЭК: четыре в Момском улусе (села Кулун-Элбют, Хоннуу, Чумпу-Кытыл и Сасыр) и два - Верхоянском улусе (села Талабах и Верхоянск) общей мощностью 6,3 МВт. Годовая экономия дизельного топлива всех

введенных в эксплуатацию к 2023г. солнечных электростанций составила более 1,5 тыс. тонн в год. АГЭК в Хонуу, территория которого пересекает Полярный круг, включает в себя крупнейшую в России северную солнечную электростанцию установленной мощностью 1,5 МВт [5]. В начале сентября 2024г. еще четыре АГЭК общей мощностью 3,7 МВт были введены в строй в селах Урицкое, Дабан и Саньяхтах Олекминского улуса и в селе Тополиное Томпонского улуса. а также два АГЭК общей мощностью 1,9 МВт были введены в строй в декабре текущего года в селах Оймякон и Орто-Балаган Оймяконского улуса (табл.1.).

Табл.1. Солнечные электростанции, введенные в эксплуатацию в составе автоматизированных гибридных энергокомплексов (АГЭК), построенных в рамках механизма энергосервисных контрактов ПАО «РусГидро» в республике Саха (Якутия)

Наименование СЭС	Муниципальное образование	Установленная мощность, кВт	Год ввода в строй
Талабах (Улахан-Кюель)	Верхоянский улус	400	2021
Верхоянск	Верхоянский улус	1030	2022
Хонуу	Момский улус	1503	2022
Сасыр	Момский улус	233	2022
Кулун-Элбют	Момский улус	103	2022
Чумпу-Кытыл	Момский улус	103	2022
Тополиное	Томпонский улус	198	2024
Урицкое	Олекминский улус	50	2024
Дабан	Олекминский улус	66	2024
Саньяхтах	Олекминский улус	198	2024
Оймякон	Оймяконский улус	230	2024
Орто-Балаган	Оймяконский улус	60	2024
Итого:		4174	

Составлено авторами по материалам ПАО «РусГидро» [5].

Данные энергокомплексы были возведены в рамках энергосервисного договора между ООО «Группа ЭНЭЛТ» и АО «Сахаэнерго», входящим в Группу РусГидро. Возврат инвестиций по соглашению с правительством Якутии в рамках таких договоров осуществляется за счет сохранения экономии расходов на топливо в тарифе в течение не менее 15 лет, после чего энергообъекты перейдут в собственность АО «Сахаэнерго». Согласно Программе развития энергетики Республики Саха (Якутия) планируется увеличить общую установленную мощность энергообъектов с 2031,38 МВт в 2023 г. до 3512,30 МВт к 2030 г. Запланированы ввод в эксплуатацию новых газовых тепловых электростанций, атомных станций малой мощности, гибридных ветроэлектростанций и солнечных электростанций с резервными дизель-генераторами, обновление объектов локальной генерации [6].

В июне 2024г. была принята Программа модернизации объектов локальной генерации для энергоснабжения удаленных и изолированных населенных пунктов на территории Дальневосточного Федерального Округа [7]. В ней выделены 2 этапа модернизации систем децентрализованного энергоснабжения. Для приоритетной модернизации 1-го этапа указаны 80 объектов энергоснабжения дизельной генерации на территории Республики Саха (Якутия) и Камчатского края с периодом окупаемости до 15 лет. Модернизация будет включать создание в указанных населенных пунктах автоматизированных гибридных энергокомплексов – с обновленными дизельными электростанциями (ДЭС), солнечными электростанциями (СЭС) различной мощности, система накопления энергии (СНЭ) и системой автоматического управления. Мощность СЭС выбирается исходя из критерия максимального процента замещения годовой выработки ДЭС с учетом пятнадцатилетнего срока окупаемости инвестиций. КИУМ СЭС принимается в Программе равным в среднем 12 - 16% в зависимости от географического расположения и проведенного моделирования по усредненным данным солнечной инсоляции. Мощность СНЭ принимается равной 55% от мощности СЭС. Емкость СНЭ принимается равной 33% от мощности СНЭ для обеспечения запуска дизель-генераторных установок (ДГУ) в течение 20 минут. СНЭ является опорным компонентом системы и служит для обеспечения надежности электроснабжения на время останова/пуска ДГУ в целях максимального использования ВИЭ-генерации. Пока в качестве ВИЭ-генерации в Программе рассматриваются лишь солнечные фотоэлектрические станции.

В рамках первого этапа, запланированного на 2024-2026гг., мощность новых ДЭС, СЭС и СНЭ соответственно составит 100 МВт, 33 МВт, 15 МВт соответственно. Объем затрат на модернизацию планируется, по предварительным оценкам, 21 млрд. руб. без учета затрат на модернизацию сопутствующей инфраструктуры. Реализацию первого этапа Программы предполагается выполнять за счет сформированных ПАО "РусГидро" соответствующих планов корпоративных действий на основе энергосервисных договоров, заключенных с частными инвесторами. Привлечение частных инвестиций на основе энергосервисного договора с учетом предоставления заемного финансирования позволит обеспечить экономическую эффективность реализации данных проектов.

3 Цели и методы исследования

Для оценки перспектив энергоснабжения с использованием ветроэнергетических ресурсов в Республике Саха (Якутия) были выполнены расчеты с использованием характеристик скоростного режима ветра на высоте 50 м за 20-летний период (2000–2020 гг.), загруженных из открытой базы данных NASA POWER на регулярной пространственной сетке с шагом $1^\circ \times 1$ [8]. Проведены расчеты коэффициента установленной мощности (КИУМ) и значений удельного потенциала электрогенерации (УПЭ) для ветроустановки (ВЭУ) Komai Haltec KWT300 kW для всего региона исследования.

Целью данного исследования является анализ ветровых ресурсов Республики Саха (Якутия) и потенциала ветроэнергетики для обеспечения электроэнергией населенных пунктов региона с учетом потребительской нагрузки в различные сезоны года. Для расчета распределения выработки ветроустановок по месяцам в течение года использованы данные по ветроэнергетике, представленные в ГИС «Возобновляемые источники энергии России» [9]. Для определения необходимого количества ветроустановок было проведено сопоставление месячных значений среднегодового потребления электроэнергии в каждом из исследуемых поселков и выработки электроэнергии одной ВЭУ. Важным этапом исследования стало проведение многофакторного анализа с использованием методов ГИС с учетом экологических ограничений на использование ветроустановок, таких как исключение ключевых орнитологических зон местообитаний и гнездования перелетных птиц.

4 Полученные результаты и их обсуждение

Результаты расчетов позволили определить распределение значений коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) по территории Якутии. Центральная юго-восточная часть территории республики характеризуется низкими значениями КИУМ - менее 5% и высокими рисками использования ветроэнергии. Значительные характеристики среднегодового КИУМ для данной ветроэнергетической установки (>10%) характерны для территорий севернее 68° с.ш. в западной и восточной частях Якутии и севернее 69° с.ш. (Усть-Янский, Аллаиховский, Нижнеколымский улусы, а также северо-восток Оленекского улуса), достигая значений более 20% на самом севере республики (Анабарский и Булунский улусы, островные территории). Именно для этой северной части региона и были произведены более подробные расчеты перспектив электроснабжения удаленных поселков с использованием ветроэнергетических ресурсов. На рисунке 1 представлено распределение значений удельного потенциала электрогенерации для северной – наиболее перспективной зоны республики для развития ветроэнергетики, где значения УПЭ превышают 1000 кВт·ч/кВт в год.

Для 30 населенных пунктов зоны децентрализованного энергоснабжения Якутии с численностью населения от 27 до 5055 жителей, исходя из соотношения прогнозируемой среднегодовой выработки и среднегодового потребления электроэнергии, рассчитано количество ветроэлектростанций Komai Haltec KWT300, необходимое для полного замещения выработки электроэнергии дизель-генераторами.

Из дальнейшего анализа были исключены наиболее крупные населенные пункты (Белая Гора, Чокурдах, Депутатский и Тикси), так как их годовое потребление электроэнергии составляет более 9000 кВт·ч. и для полной замены мощности требуется от 40 до 60 ветроустановок, что не представляется экономически целесообразным. Однако ветроустановки могут частично снизить нагрузку на дизельные электростанции и обеспечить экономию топлива, как в поселке Тикси.

Табл. 2. Расчетное необходимое количество ветряных турбин для населенных пунктов Республики Саха (Якутия)

Село Республики Саха (Якутия)	Количество жителей	Среднегодовое потребление электроэнергии, тыс. кВт.ч.	КИУМ %	Годовая выработка электроэнергии, тыс. кВт.ч.	Удельный потенциал электрогенерации, тыс. кВт.ч./кВт	Необходимое количество ВЭУ
Саскылах	2317	7,417	20,66	0,543	1,81	14
Юрюнг-Хая	1148	3,737	20,87	0,548	1,83	7
Таймылыр	757	1,790	25,63	0,673	2,25	3
Кюсюр	1718	4,136	22,36	0,587	1,96	7
Найба	522	1,357	19,42	0,510	1,70	3
Хайыр	433	0,617	18,96	0,498	1,66	1
Казачье	1367	3,376	19,58	0,514	1,71	7
Усть-Куйга	979	7,721	20,44	0,537	1,79	14
Усть-Янск	275	0,523	19,58	0,514	1,71	1
Тумат	533	0,786	19,64	0,516	1,72	2
Нычалах	117	0,402	12,55	0,329	1,10	1
Оленегорский	250	0,619	13,44	0,353	1,18	2
Колымское	811	1,883	11,43	0,300	1,00	7

Для двух поселков (Усть-Куйга и Саскулах) получены потребности в 14 ВЭУ, что также не эффективно из-за очень высоких финансовых затрат. Для поселка Усть-Куйга, где ведется промышленная добыча золота и потребление электроэнергии будет увеличиваться, уже разработан альтернативный план начала строительства в 2024 году атомной станции малой мощности (около 50 МВт). Пространственный анализ среднегодовой выработки и коэффициента использования установленной мощности с использованием инструментов ГИС [10-12], а также анализ территории с точки зрения экологических ограничений (исключение ключевых орнитологических территорий (КОТР) и водно-болотных угодий) позволили выделить перспективные населенные пункты с высоким потенциалом замещения дизельной генерации ветроэнергетикой. К ним относятся 11 изолированных поселков с численностью населения менее 2000 человек, имеющих резервные дизель-генераторы (в Булуномском, Усть-Янском, Анабарском, Аллаиховском и Нижнеколымском улусах).

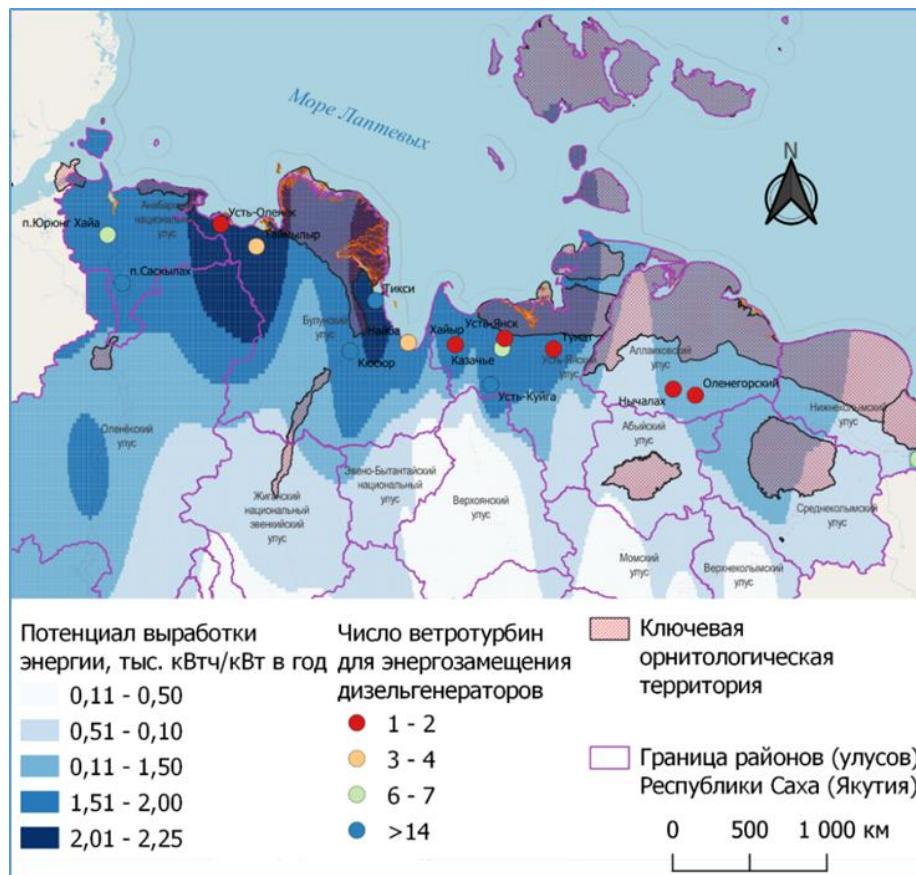


Рис. 1. Распределение удельного потенциала электрогенерации (УПЭ) ветроустановки Komai Haltes KWT300 по северной территории Республики Саха (Якутия)

Для ряда северных поселков, несмотря на высокий удельный потенциал ветрогенерации (около 1500 кВт·ч/кВт), размещение ветроустановок ограничено высокими экологическими рисками, поскольку они расположены на или вблизи международных ключевых орнитологических территориях (КОТР) [13]. В работе [14] описано, что в настоящее время угрозой для орнитофауны при строительстве ветроустановок является не непосредственное столкновение с лопастями, а потеря мест обитания, гнездования и т.п. При этом уязвимыми являются редкие виды, а также, в большей степени крупные виды птиц (журавли, гуси), хищники (беркуты, сапсаны и т.п.), производящие перелёты, охоту на высотах современных ветроустановок 100-200 м. Именно этим видам уделялось особое внимание при оценке возможности использования ветропотенциала посёлков Северной Якутии.

Поселок Походск, входящий в КОТР «Дельта Колымы», расположен на приморской равнине с многочисленными мелководными озёрами. Строительство ВЭС здесь будет затруднено одновременно и инженерно-геологическими условиями, и наличием большого количества охраняемых видов околоводных и водоплавающих птиц. Поселки Чокурдах и Русское Устье расположены на КОТР «Кыталык». Оба поселка размещаются на высокой аллювиальной террасе р. Индигирка, что говорит о более благоприятных локальных инженерно-геологических условиях (отсутствии заболоченных низменностей и мелких озёр в непосредственной близости от поселков). Вышеупомянутые поселки не находятся в пределах границ резервата республиканского значения «Кыталык». Однако имеют в своей близости участки данного резервата с возможными местами гнездования редких видов птиц. Виды, распространенные на территории (стерх, сапсан и др.) особо уязвимы к объектам ветроэнергетики, и использование ветроустановок здесь должно сопровождаться обязательными орнитологическими наблюдениями [14]. Также в сложном орнитологическом районе расположен поселок Нижнеянк в КОТР «Дельта Яны и река Сюрюктях». Условия строительства здесь ВЭС также осложняются сильными ежегодными разливами р. Яна. Хотя непосредственно сами энергетические объекты могли бы внести вклад в развитие стратегического порта, расположенного на территории посёлка. Поселок Сиктях, фактически находящийся вне границ КОТР «Муна-Бесюке», также отнесён к территориям с высокой уязвимостью птиц ввиду расположения в его близости большого количества островов (входящих в КОТР «Муна-Бесюке»), на которых могут отдыхать во время полётов над р. Леной и гнездиться птицы .

Для оценки перспектив энергоснабжения изолированных населенных пунктов Республики Саха (Якутия) за счет использования ветроэнергетических ресурсов было проведено сравнение динамики изменения энергопотребления поселков и графиков выработки электроэнергии для расчетного количества ВЭУ в течение года. На рис. 2 приведены графики изменения энергопотребления и расчетной выработки электроэнергии для поселков Таймылыр и Найба при варианте строительства 3 ВЭУ. В зимние месяцы (январь-март) для поселка Таймылыр выработка электроэнергии существенно ниже потребления электроэнергии, в то время как в остальное время года графики весьма близки. Для поселка Найба, расположенного на значительном расстоянии к юго-востоку от поселка Таймылыр, отмечена иная тенденция: если в первой половине года выработка электроэнергии на ВЭУ ниже потребности в электроэнергии, то с июня и до конца года - потребление электроэнергии может быть полностью обеспечено вырабатываемой ВЭУ энергией. Представленные расчеты могут служить основанием для оценок необходимой мощности дублирующих дизельных установок и емкости накопителей электроэнергии. Однако необходимо указать, что для использования ветроэнергетических ресурсов в данной зоне необходимы отечественные разработки и производство ВЭУ небольшой мощности в арктическом исполнении в связи с высокими рисками ураганных ветров, образования наледи на лопастях и проблем со смазочными материалами [15].

Табл. 3. Характеристика ключевых орнитологических территорий Северной Якутии, в зону которых попадают перспективные для ветроэнергетических проектов поселки*

Поселки с высоким потенциалом использования ветровой энергии	Наименование КОТР и его описание	Площадь КОТР, га (% от площади) и его природоохранный статус
<p>Село Походск. Население 150 человек. Основной вид занятости - рыболовство. Переработка рыбы затруднена нехваткой энергетических мощностей. Дизельное топливо завозится в село по реке из пос.Черский.</p>	<p>Дельта Колымы Большая дельта с протоками и многочисленными мелководными озерами. Низкая равнина с участками приморских тундр и галофитными лугами в северной части сменяется южнее гипоарктическими тундрами полигональными болотами и травяными речками с бордюрованными зарослями ивняков. Место крупных скоплений на гнездовье, линьке и в созданного в 2002 г. период миграций многих видов водоплавающих и околоводных птиц, в т.ч. малого лебедя, сибирской гаги, канадского журавля, клокутуна, розовой чайки.</p>	<p>1295000 (около 35%) КОТР частично охраняется в пределах ресурсных резерватов республиканского значения «Чайгурино» (участок «Чукочьа»), созданного 1982 г., и «Колыма-Корэн».</p>
<p>Поселки Чокурдах и Русское Устье. Основной вид занятости - рыболовство. В пос. Устье переработка рыбы затруднена нехваткой энергетических мощностей.</p>	<p>Кыталык Участок Яно-Индибирской низменности в Аллаиховском улусе республики Саха. Озерные и речные системы, осоковые и осоково-пушицевые болота, полигонально-валиковые тундроподобные комплексы. В пределах КОТР располагаются два из трех очагов воспроизводства восточной популяции стерха (примерно 2/3 ресурсного мировой гнездовой популяции). Места концентрации на гнездовании, линьке и пролете других водоплавающих и околоводных птиц. Обитают сапсан, канадский журавль, розовая чайка, американская казарка, пискулька, сибирская и очковая гаги, клокутун.</p>	<p>5000000 (около 80%) Значительная часть КОТР охраняется в границах ресурсного резервата республиканского значения «Кыталык» (6 участков площадью 2598595 га) и ресурсного резервата «Кыталык» местного значения (2 участка площадью 1472004 га).</p>

<p>Поселок городского типа Нижнеянск. В поселке - стратегический порт «море-река», через который происходит снабжение сел, расположенных на р.Яна. Развитие инфраструктуры и потребность в новых источниках энергии возможна за счёт развития близлежащих месторождений. Рассматривается строительство АЭС.</p>	<p>Дельта Яны и река Сюрюктях Полоса заболоченной приморской равнины в дельте р.Яны с системой проток, соленых и пресноводных озер и прилегающий к ней на востоке участок Яно-Индигирской низменности. Крупное место концентрации водно-болотных птиц на гнездовании и линьке (не менее 200 тыс. водоплавающих птиц). Район важен для сохранения стерха, канадского журавля, черной казарки, малого лебедя, сибирской и очковой гаг. Гнездится ок. 14% мировой популяции розовой чайки.</p>	<p>2105000 (около 20- 25%) Часть КОТР охраняется в пределах ресурсного резервата республиканского значения «Дельта Яны» (321016 га, создан в 1999 г.).</p>
<p>Поселок Сиктях. Основной вид занятости - рыболовство, оленеводство, охота.</p>	<p>Муна-Бесюке Расширяющийся участок долины Нижней Лены перед «Ленской Трубой» - система островов с многочисленными озерами и протоками. Места массового пролета и остановок водоплавающих и околоводных птиц, высокой плотности гнездования беркута (до 10 гнезд), орлана-белохоста (до 15 гнезд), серебристой чайки, других видов колониальных, протоколониальных и одиночно-гнездящихся птиц, формирующих здесь уникальные крупные поливидовые агрегации. Через КОТР проходит один из основных потоков весеннего и осеннего пролета птиц, в т.ч. пискульки.</p>	<p>550000 (около 4%) Созданный в 2000 г. республиканский ресурсный резерват «Муна», расположенный преимущественно вне Ленской поймы, охватывает не более 4% выделенной КОТР в ее южной части.</p>

**(Табл.3. составлена авторами на основе данных проекта «Ключевые орнитологические территории России» <https://котр.рф/>, анализа космических снимков высокого разрешения и открытых источников в сети Интернет)*

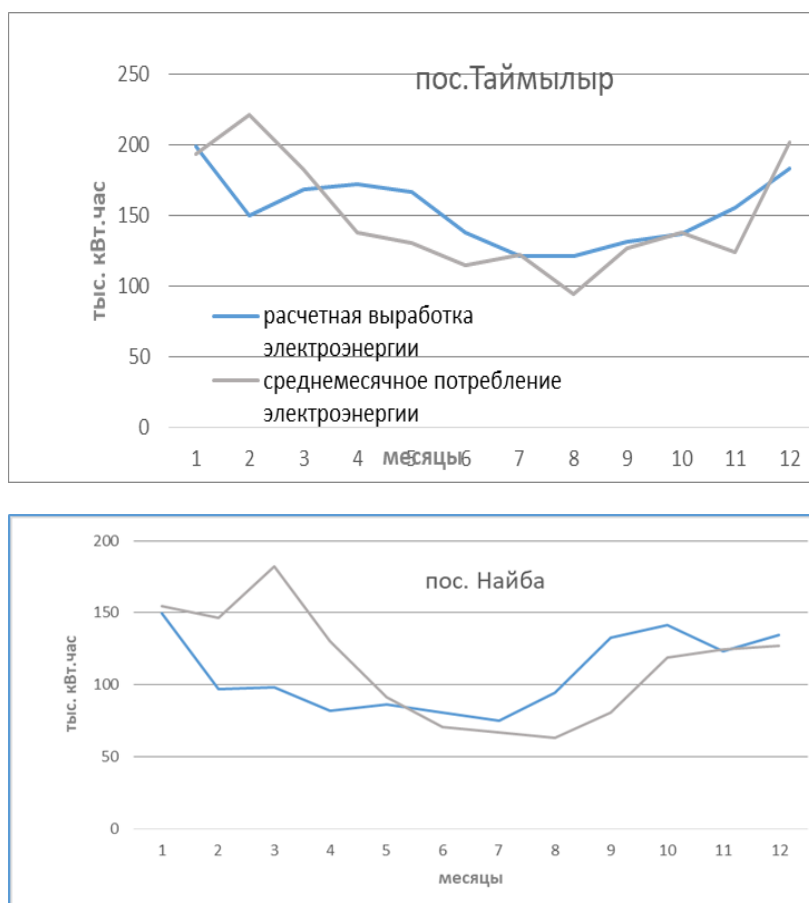


Рис.2. Сравнение среднего месячного энергопотребления и расчетной выработки электроэнергии ветроустановок Komai Haltec KWT-300 в течение года для поселков Таймылыр и Найба

Проблемы сезонного накопления при энергоснабжении крупных населенных пунктов Якутии в перспективе могут быть решены также с привлечением производства «зеленого водорода», поскольку наблюдаются значительные периоды избыточной выработки электроэнергии на ветропарках по сравнению с графиками энергопотребления [16-17].

5 Заключение

Проведенные исследования по оценке перспектив энергоснабжения Республики Саха (Якутия) с использованием ветроэнергетических ресурсов показали высокую пространственную изменчивость распределения ресурсов. Максимальные среднегодовые значения КИУМ (более 15-20%) и удельного потенциала электрогенерации ветроэнергетической установки Komai Haltec KWT300 (более 1500 кВт·ч/кВт) характерны для территорий севернее 68° с.ш., на остальной территории республики при высоком потенциале ресурсов солнечной энергии потенциал развития ветроэнергетики крайне низок. На основе имеющихся данных об энергопотреблении в изолированных северных поселках проведены расчеты необходимого количества ветроустановок для замены дизель-генераторов, что необходимо в связи с очень высокой стоимостью доставки топлива и поддержания экологического баланса в Арктической зоне Российской Федерации. В качестве важного ограничивающего фактора использования ветроэнергетических ресурсов в этой зоне учтено наличие КОТР, являющихся местами обитания и гнездования перелетных птиц, что существенно сократило количество перспективных площадок для развития ветроэнергетики. Многофакторный анализ с использованием ГИС-технологий позволил выделить 11 перспективных поселков для строительства ветроэнергоустановок. Сопоставление данных об энергопотреблении и расчетной выработке ветроэнергоустановок для изолированных поселков по годовому ходу покрытия нагрузки показало существенные внутригодовые расхождения. В связи с высоким уровнем внутригодовой изменчивости выработки электроэнергии на ВЭУ для устойчивого энергоснабжения удаленных населенных пунктов в зоне децентрализованного энергоснабжения потребуются дублирование мощностей ВЭУ дизель-генераторами, как и при работе СЭС в Якутии. Автономная работа ветроэнергетических комплексов для энергоснабжения Республики Саха (Якутия) требует аккумулирования энергии по суточным и сезонным графикам.

Авторы выражают благодарность в.н.с. ОИВТ РАН, к.т.н. Фриду С.Е. за предоставленные данные о производительности фотоэлектрических модулей.

Работа выполнена в рамках государственного задания №121051400082-4.

Литература

1. Климат России. Под ред. Н.В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеоздат, 2001
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР, серия 3, ч.1-6, вып. 24, Л.: Гидрометеоздат, 1989
3. ГИС «Возобновляемые источники энергии России» <https://gisre.ru/map-sunres/?surface=gor&period=summer>
4. Официальный сайт АО «РАО Энергетические системы Востока» <https://rao-esv.ru/activity/renewable-energy/solar-power/>

5. Официальный сайт ПАО «РусГидро»
<https://rushydro.ru/activity/production/solnechnaya-generatsiya/>
6. Инвестиционная программа АО «СахаЭнерго» 2023-2027. Приказ Минэнерго России от 10.10.2022 № 6. <https://gipro.su/base/investicionnaya-programma-sakhaenergo-page-4/>
7. Программа модернизации объектов локальной генерации на территории Дальневосточного федерального округа. Утверждена Правительством Российской Федерации 10 июня 2024г.
8. NASA POWER database <https://power.larc.nasa.gov>
9. ГИС «Возобновляемые источники энергии России»
<https://gisre.ru/winddata/winddatabase/>
10. S.V.Kiseleva, N.V.Lisitskaya, O.S., Yu.Yu.Rafikova et al. Thermal Engineering, 70 (2023), 939-949.
11. Martínez-Martínez, J. Dewulf, and Y. Casas-Ledón. Renewable Energy 182, 363–376 (2022).
12. Santoli, F. Mancini, and D. A. Garcia. Sustainable Cities Soc. 46, 101413 (2019).
13. Геоинформационная база пространственных данных по ключевым орнитологическим территориям России, 2023. Союз охраны птиц России, 2023.
14. Рафикова Ю. Ю., Потанский В. Г. О воздействии объектов ветроэнергетики на орнитофауну // Географические и геоэкологические исследования в решении региональных экологических проблем: Материалы Всероссийской научно-практической конференции Вопросы региональной географии, геоэкологии и биogeографии, Рязань, 22-24 ноября 2017 г. — Издательство РГУ имени С.А. Есенина Рязань: 2017. — С. 93–97.
15. Нефедова Л. В., Соловьев А. А. Новые вызовы и риски на пути развития распределенной энергогенерации в Арктическом регионе России // Энергетическая политика. — 2018. — № 4. — С. 99–108.
16. S.V.Kiseleva. A.B.Tarasenko, ISJAEЕ, 19-21 (2018)
17. A.M. Elberry, J. Thakur, J. Veysey J. Energy Storage, 44, 103474 (2021)

References

1. Climate of Russia. Ed. by N.V. Kobysheva. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2001
2. Scientific and applied reference book on the climate of the USSR, series 3, parts 1-6, issue 24, L.: Gidrometeoizdat, 1989
3. GIS “Renewable Energy Sources of Russia” <https://gisre.ru/map-sunres/?surface=gor&period=summer>
4. Official website of JS «RAO Energeticheskie sistemy Vostoka» <https://rao-esv.ru/activity/renewable-energy/solar-power/>
5. Official website of PJSC RusHydro. <https://rushydro.ru/activity/production/solnechnaya-generatsiya/>
6. Investment program of «SAKHAENERGO» JSC 2023 – 2027. <https://gipro.su/base/investicionnaya-programma-sakhaenergo-page-4/>
7. Program for the modernization of local generation facilities in the Far Eastern Federal District. Approved by the Government of the Russian Federation on June 10, 2024
8. NASA POWER database <https://power.larc.nasa.gov>
9. GIS “Renewable Energy Sources of Russia” <https://gisre.ru/winddata/winddatabase/>

10. S.V.Kiseleva, N.V.Lisitskaya, O.S.Popel¹, Yu.Yu.Rafikova et al. *Thermal Engineering*, 70 (2023), 939-949.
11. Martínez-Martínez, J. Dewulf, and Y. Casas-Ledón. *Renewable Energy* 182, 363–376 (2022).
12. Santoli, F. Mancini, and D. A. Garcia. *Sustainable Cities Soc.* 46, 101413 (2019).
13. Geoinformation database of spatial data on Important Bird Areas of Russia, 2023. Russian Bird Conservation Union, 2023.
14. Rafikova Yu. Yu., Potansky V. G. On the impact of wind power facilities on the avifauna // Geographical and geoecological studies in solving regional environmental problems: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference Issues of regional geography, geoecology and biogeography, Ryazan, November 22-24, 2017. - Publishing House of RSU named after S.A. Yesenin Ryazan: 2017. - P. 93-97.
15. Nefedova L. V., Soloviev A. A. New challenges and risks on the way to the development of distributed energy generation in the Arctic region of Russia // *Energy policy*. - 2018. - No. 4. - P. 99-108.
16. S.V.Kiseleva. A.B.Tarasenko, *ISJAEE*, 19-21 (2018)
17. A.M. Elberry, J. Thakur, J. Veysey *J. Energy Storage*, 44, 103474 (2021)

Decentralized Electricity Generation Using Renewable Energy Sources in the Republic of Sakha (Yakutia): Potential, Status, Prospects

¹Liudmila Nefedova, ²Yulia Rafikova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,

E-mail: ¹ nefludmila@mail.ru, ² ju.rafikova@mail.ru

Abstract. The problems of energy supply of decentralized power zones and climatic features of Yakutia, causing differences in the distribution of solar and wind energy resources potential across the republic, are considered. Trends in the development of solar energy resources in recent years are shown. An analysis of the possibilities of attracting wind energy resources to provide electricity in the Arctic Circle of Yakutia is carried out. The modeling data of the KomaiHaltec KWT300 wind turbine performance using the NASA SSE climatic base served as the basis for assessing the specific wind energy potential in the republic. Using GIS tools, zones with the highest values of the capacity factor are identified. For some settlements in this zone, calculations of the prospects for autonomous power supply are made based on energy consumption data. When assessing, ornithological restrictions for the use of wind turbines in the northern part of Yakutia are taken into account. Calculations made it possible to identify 11 settlements where the use of wind energy to supply energy to isolated settlements in the North of Yakutia is most promising.

Keywords: renewable energy resources, wind energy potential, decentralized energy supply, energy consumption, ornithological territories

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of state assignment No.121051400082-4.

УДК 621.311.24.

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-4-50-61

EDN: AIVGEL

XIV Всероссийская научная молодёжная школа с международным участием «Возобновляемые источники энергии. Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике»

¹ Дегтярев Кирилл Станиславович ^[0000-0002-1738-6320],² Рафикова Юлия Юрьевна ^[0000-0003-3204-9135]

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: ¹ kir1111@rambler.ru, ² ju.rafikova@mail.ru

Аннотация. Статья информирует об очередной Всероссийской научной молодёжной школе с международным участием, посвящённой возобновляемой энергетике – «Возобновляемые источники энергии. Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике», прошедшей на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова. Рассмотрены лекции, доклады, основные направления и вопросы, которые обсуждались на мероприятиях Школы. Тематика лекций и докладов молодых учёных в 2024 году отражала уровень и направления развития возобновляемой энергетики в России и в мире, оценку роли возобновляемой энергетики в декарбонизации экономики, а также последствий увеличения доли ВИЭ в производстве электроэнергии.

Ключевые слова: научная школа, образование, молодые учёные, возобновляемые источники энергии, география энергетики, солнечная энергетика, гидроэнергетика, биоэнергетика, ветроэнергетика, электротранспорт, аккумуляция энергии, баланс углерода.

20-23 ноября 2024 года на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова прошла очередная Всероссийская научная молодёжная школа (НМШ) с международным участием «Возобновляемые источники энергии. Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике», о которой сообщалось ранее [1]. Это уже четырнадцатая НМШ «Возобновляемые источники энергии» в цикле мероприятий, проводимых научно-исследовательской

лабораторией ВИЭ географического факультета МГУ. Первое мероприятие состоялось в 1999 году. Таким образом, в этом году Школа отмечала свой 25-летний юбилей. Традиционно НМШ проводит Научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии (НИЛ ВИЭ) [<https://www.geogr.msu.ru/structure/labs/vie/>] под эгидой Географического факультета МГУ при тесном сотрудничестве с другими академическими и производственными организациями, работающими в сфере энергетики, исследования и использования природных ресурсов. В этот раз, как и в 2022 году, в качестве её со-организатора выступил Институт энергетических исследований (ИНЭИ) РАН [<https://www.eriras.ru/>], а также Исполнительный комитет Электроэнергетического Совета СНГ [<http://energo-cis.ru/>].

Прежде всего, необходимо отметить, что Школа в текущем году, как и двумя годами ранее, проходит в сложном для России – в том числе, для отечественной возобновляемой энергетики (ВЭ), – геополитическом и экономическом контексте. В частности, ряд западных энергетических компаний, начиная с 2022 года, покинули российский рынок, что усложнило реализацию инвестиционных проектов в сфере ВЭ и, более того, привело к остановке работы некоторых производств, развёрнутых в России.

Очевидно, что «висел в воздухе» вопрос о возможности и необходимости развития возобновляемой энергетики в России как таковой. Тем более, известно, что тематика «энергетического перехода» к неуглеродной экономике, где ключевую роль играет увеличение доли ВЭ в производстве энергии, тесно связан с «климатической повесткой», наиболее активно продвигаемой западноевропейскими странами и влиятельными политическими кругами США.

Концепция потепления климата, обусловленного, в первую очередь, антропогенными процессами, равно как и акцент, главным образом, на его отрицательных последствиях, достаточно давно встречает скептическое отношение со стороны ряда российских учёных, в частности [2, 3]. Кроме того, неоднократно вставал вопрос об экономической и технологической целесообразности широкого использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в российских энергосистемах. Участие России в данной повестке связывалось, прежде всего, с политическими причинами. Как следствие, ухудшение отношений с западными странами, включая ослабление или разрыв многих экономических связей, неизбежно ставит вопрос о целесообразности продолжения этого участия и, как следствие, – стимулирования использования ВИЭ в России.

Тем не менее, Школа – 2024, так же, как и Школа – 2022, продемонстрировала сохранение интереса к возобновляемой энергетике в нашей стране – об этом уже можно сказать со всей определённой. Отметим, что вопрос о смысле ВИЭ вне «климатической повестки» поднимался на Школе в порядке дискуссии, и участниками было отмечено, что развитие энергетики на основе возобновляемых источников имеет ряд важнейших аспектов, обусловленных не столько климатической повесткой, сколько необходимостью развивать инновации в широком поле областей: энергетика и электротехника, гибридные энергетические системы, материаловедение, накопители энергии и т.д. Немаловажным для России остается задача сокращения широкого спектра выбросов в окружающую среду – как от

объектов тепловой энергетики, так и от полигонов отходов (потенциальных ресурсов для производства энергии методами биоэнергетики).

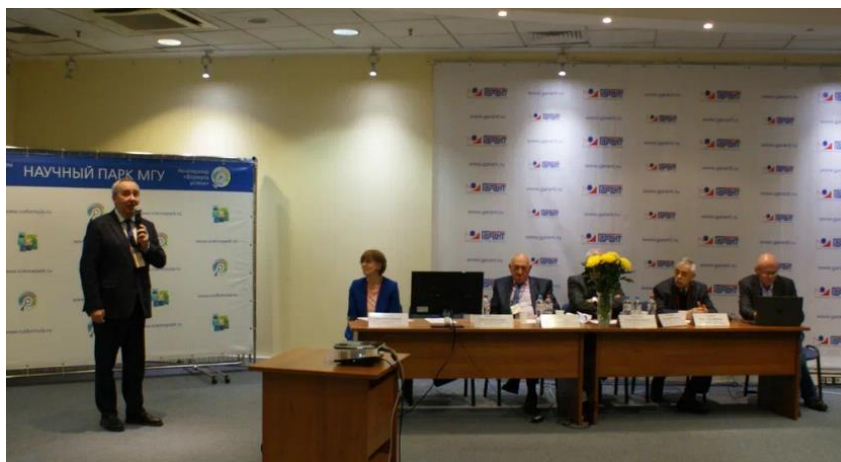


Рис. 1. Приветствие декана географического факультета МГУ, академика РАН С.А.Добролюбова на НМШ ВИЭ-2024
(фото Залиханова А.М.)



Рис. 2. Участники НМШ ВИЭ-2024
(фото Залиханова А.М.)

В связи с этим движение в направлении развития технологий ВЭ сохраняет целесообразность независимо от текущей политической конъюнктуры или дискуссионных климатологических концепций. В этой связи нельзя не сказать, что, с одной стороны, сохраняется политика стимулирования использования ВИЭ в России со стороны государства; с другой – возобновляемую энергетику нельзя считать сугубо западным проектом, лидирующие позиции в ней в настоящее время занимает Китай и ряд других государств Азии и Латинской Америки, существуют программы её развития практически во всех регионах мира.

Таким образом, тема ВИЭ сохраняет свою актуальность и для России, а проводимые Школы ВИЭ не теряют своего научного и практического смысла.

В этом году, как и в предыдущие годы, проведение Школы включало два основных блока: лекции ведущих специалистов в возобновляемой энергетике и смежных областях и доклады молодых учёных.

В начале Школы традиционно прозвучали вступительные приветственные слова. Декан географического факультета МГУ академик С.А. Добролюбов рассказал участникам Школы о роли прикладных исследований, связанных с инновационными технологиями, в географических науках. Заместитель директора по научной работе, Института энергетических исследований РАН доктор технических наук А.В. Кейко обозначил основные актуальные направления в современных научных исследованиях в области возобновляемой энергетики. Также выступили заведующий кафедрой рационального природопользования географического факультета МГУ доктор экономических наук М.В. Слипенчук, директор Департамента внешних связей Исполнительного комитета Электроэнергетического Совета СНГ кандидат технических наук Г.В. Ермоленко и заведующий НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ кандидат физико-математических наук С.В. Киселёва.

Темы лекций и докладов приведены в таблице 1. Тематика докладов была традиционно широкой, включающей и технические, и экономические, и географические аспекты ВИЭ. Большое внимание в лекциях было уделено тенденциям развития ВЭ в мире и в России, оценкам вклада возобновляемой энергетики в декарбонизацию России и других стран. Традиционно представлены были отечественные разработки в области технологий солнечной энергетики и малой гидроэнергетики, обзор развития технологий в области накопления энергии. Отличительной особенностью Школы этого года стали лекции географической тематики о внутри-региональных стратегиях снижения загрязнения в РФ от сжигания топлива, геоинформационных системах в возобновляемой энергетике, об оценках выбросов и возможностей поглощения парниковых газов. В целом, в соответствии с тематикой Школы, достаточно внимания было уделено исследованиям круговорота углерода и уменьшения загрязнения окружающей среды. Тематика докладов молодых учёных варьировалась от технической до экономической. Также, как и в лекциях, молодыми участниками были представлены исследования, проводимые ими на географическом факультете МГУ.

Таблица 1. Темы лекций и устных докладов XIV Школы «Возобновляемые источники энергии. Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике»

Докладчик	Тема доклада
Лекции специалистов	
Попель О. С., д.т.н., г.н.с. ОИВТ РАН	Методические основы оценки вклада возобновляемых источников энергии в декарбонизацию российской энергетики
Кулагин В.А., зав. отделом исследования энергетического комплекса мира и России, ИНЭИ РАН	Перспективы развития мировой энергетики до 2050 г. – роль ВИЭ
Битюкова В.Р., д.г.н., профессор кафедры экономической и социальной географии России Географического факультета МГУ	Внутри-региональные стратегии снижения загрязнения от сжигания топлива в Российской Федерации
Теруков Е.И., д.т.н., зам. директора по научной работе НТЦ тонкопленочных технологий Физико-технического Института РАН им. А.Ф.Иоффе	Солнечная энергетика на кремнии: основные тренды
Зубакин В.А., д.э.н., зав. кафедрой ВИЭ НИУ нефти и газа им. И. М. Губкина	Декарбонизация Азии: вызов для России?
Колпаков А. Ю., к.э.н., зав. лаб. анализа и прогнозирования климатических рисков экономического развития, ИНП РАН	Роль ВИЭ в Стратегии низкоэмиссионного развития России
Бляшко Я.И., к.т.н., директор МНТО «ИНСЭТ»	Проекты малой гидроэнергетики в России: проблемы и перспективы
Тарасенко А.Б., с.н.с. ОИВТ РАН	Современные технологии аккумулирования энергии, включая гибридные системы
Вдов Л.И., рук. отдела ветро-энергетических расчётов ГК А.ЕСО	Современное состояние ветроэнергетики в мире
Киселева С.В., к.ф.-м.н., и.о. зав. НИЛ ВИЭ Географического факультета МГУ, Рафикова Ю.Ю., к.г.н., с.н.с. НИЛ ВИЭ	Современные ГИС-технологии в возобновляемой энергетике и оценках декарбонизации энергетики. ГИС «ВИЭ России»
Хоршев А.А., к.э.н., в.н.с. ИНЭИ РАН	Совместное использование моделей развития и диспетчеризации мощностей для оценки ресурсов гибкости для меняющихся режимов функционирования ЕЭС России при росте доли безуглеродных источников

Докладчик	Тема доклада
Репина И. А., д.ф.-м.н., проф. Ин-та Физики Атмосферы им. А.М. Обухова РАН	Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидро-энергетических объектов
Молодёжная сессия	
Скубачевская Н.Д., аспирант ИНП РАН, г. Москва	Принципы развития системы ценообразования на выбросы парниковых газов в России с учетом международного опыта
Любчик О.А., БНТУ, г. Минск, Беларусь	Потенциал возобновляемых источников энергии и усовершенствование методик его оценки
Лазеева Е.А., н.с. ИНП РАН, г. Москва	Оценка влияния изменения климата на экономику России на примере интегрированных оценочных моделей
Местников Н.П., к.т.н., н.с. СВФУ им. М.К. Аммосова, г.Якутск	Разработка способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций в условиях Севера
Житцова Е.Ю., студент Геогр. ф- та МГУ	Потенциал солнечной энергетики для обеспечения систем кондиционирования в Краснодарском крае
Садринов К.Д., магистрант Геогр. ф-та МГУ	Сравнительный анализ экологических аспектов низкоуглеродного развития России и Китая
Губий Е.В., к.т.н., н.с. Ин-та си- стем энергетики им. Л.А.Мелен- тьева СО РАН, г.Иркутск	Оценка использования газогенераторных электростанций на биотопливе в децентрализованных зонах электроснабжения
Музафаров Э.Р., аспирант ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск	Исследование и прогноз динамики и основных технических трендов в отрасли производства электромобилей за период с 1995 до 2025 года
Мысленков С.А., к.ф.-м.н., н.с. географического факультета МГУ	Использование индекса SPI для исследования динамики штормовой активности в некоторых морях России
Прутских М. С., аспирант РХТУ им. Д.И.Менделеева	Предпосылки развития солнечной и ветровой энергетики в Арктической зоне Российской Федерации
Маринец А.Р, студент СПГУ им. императрицы Екатерины II, г.Санкт-Петербург	Синтез и исследование биодобавок для улучшения экологических характеристик дизельного топлива
Аветисян А. С., магистрант ИННТУ, г.Иркутск	Исследование систем энергоснабжения для сельской микросети с использованием возобновляемых источников энергии
М. Аль-Хузайе, аспирант РУДН им. Патриса Лумумбы	Снижение воздействия альтернативных видов топлив на окружающую среду в автомобилях с ДВС

Докладчик	Тема доклада
Андреева К. А., магистрант, инженер-исследователь МЭИ	Моделирование зарядных и разрядных характеристик аккумуляторных батарей на основе натурных данных
Васильева А.А., магистрант, инженер-исследователь МЭИ	Оценка применимости методов расчёта характеристики расхода топлива дизель-генераторной установки
Минасов А.Г., магистрант МГИМО МИД России	Необходимость внедрения дополнительных государственных мер поддержки ВИЭ в России с учетом опыта зарубежных стран
Шевырёв С.А., к.т.н., н.с. КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово	Паровая газификация биомассы в кипящем слое
Магомедов М.А., студент ДГУ, г.Махачкала	Состояния и перспективы электропотребления и электроснабжения регионов СКФО
Сильвестрова В.А., студент РГАУ-МСХА им.К.А.Тимирязева,	Особенности годового хода и пространственного распределения потоков CO ₂ и CH ₄ на территории России по данным спутника GOSAT
Шувалова Ю.Н., магистрант, н.с. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород	Алгоритм управления энергетическими комплексами на основе водородных топливных элементов с применением искусственных нейронных сетей
Кемпель С.В., студент МГТУ им. Н.Э. Баумана	Улучшение характеристик ротора Савониуса с использованием направляющих из солнечных батарей
Матюшенко А.Д., аспирант БГУ, г. Минск, Беларусь	Экономическая оценка территории размещения различных видов энергоисточников на примере Республики Беларусь
Аликеримова Т.Д. ДГУ, г.Махачкала	Экологические аспекты использования возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан
Скафарик А.И., аспирант географического ф-та МГУ	Оценка эффективности использования солнечной микрогенерации для электро- и теплоснабжения в регионах РФ
Арапов М.А., аспирант ОИВТ РАН	Возможности покрытия дефицита электроэнергии в Дальневосточном федеральном округе за счет интеграции солнечных электростанций
Аликин Р.О., аспирант, м.н.с. ИНЭИ РАН	Экономические последствия декарбонизации энергетики
Бахмадов А.В., магистрант МГТУ им.Н.Э.Баумана	Система круглогодичной термостабилизации многолетнемерзлых грунтов с использованием ВИЭ

Докладчик	Тема доклада
Баденко В.В., аспирант ИСЭ им.Л.А.Мелентьева СО РАН, г.Иркутск	Подход к исследованию образования газобразных продуктов при термохимической конверсии биомассы средствами ТГА-МС
Бадамшина С.Ю., студент МГТУ им. Н.Э. Баумана	Теплоаккумуляция как способ обеспечения энергетической гибкости систем с ВИЭ
Багаматов Г.З., инженер Института Проблем Геотермии и Возобновляемой Энергетики – филиал ОИВТ РАН, г.Махачкала	Перспективные теплоаккумулирующие материалы для геотермальных установок
Кузнецова А.С., магистрант Географического ф-та МГУ	Пространственная структура малой гидроэнергетики России
Мордынский А.В., н.с. ОИВТ РАН	Выбор модели ясного неба для оценки суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в высоких широтах России
Бурова И.М. Географический ф-т МГУ	Проблемы и перспективы энергетической утилизации отходов в качестве возобновляемого ресурса в России



Рис. 3. Дискуссии на НМШ ВИЭ-2024.
Фото А.М.Залиханова и С.Е.Фрида

Если обратиться к статистике Школы, то в 2024 году в мероприятии в очном и дистанционном форматах приняли участие около 200 человек. Было прислано около 50 заявок с докладами и 150 заявок слушателей, всего же в программу было отобрано 12 докладов ведущих специалистов, 35 устных и 5 стендовых докладов молодых участников (см. табл. 1).

География российских участников представлена городами Москва, Санкт-Петербург, Ижевск, Иркутск, Кемерово, Махачкала, Нижний Новгород, Элиста, Якутск. Из стран СНГ выступили представители Белоруссии и Таджикистана.

Как и в прошлые годы, живое общение и дискуссии в ходе Школы способствовало возникновению новых научных контактов и объединению научных идей.

По итогам НМШ издан сборник докладов с индексацией в РИНЦ [4].

В завершение мероприятия лучшие доклады молодых ученых были отмечены дипломами и памятными призами. Лауреатами конкурса лучших докладов среди молодых учёных стали:

1. Аликин Р.О., аспирант, м.н.с. ИНЭИ РАН "Экономические последствия декарбонизации энергетики"

2. Андреева К. А., магистрант, инженер-исследователь МЭИ "Моделирование зарядных и разрядных характеристик аккумуляторных батарей на основе натуральных данных"

3. Бадамшина С.Ю., студент МГТУ им. Н.Э. Баумана "Теплоаккумулирование как способ обеспечения энергетической гибкости систем с ВИЭ"

4. Баденко В.В., аспирант ИСЭ им.Л.А.Мелентьева СО РАН, г.Иркутск "Подход к исследованию образования газообразных продуктов при термохимической конверсии биомассы средствами ТГА-МС"

5. Васильева А.А., магистрант, инженер-исследователь МЭИ "Оценка применимости методов расчёта характеристики расхода топлива дизель-генераторной установки"

6. Губий Е.В., к.т.н., н.с. Института систем энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН, г.Иркутск "Оценка использования газогенераторных электростанций на биотопливе в децентрализованных зонах электроснабжения"

7. Матюшенко А.Д., аспирант БГУ, г. Минск, Беларусь "Экономическая оценка территории размещения различных видов энергоисточников на примере Республики Беларусь"

8. Местников Н.П., к.т.н., н.с. СВФУ им. М.К. Аммосова, г.Якутск "Разработка способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций в условиях Севера"

9. Музафаров Э.Р., аспирант ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск "Исследование и прогноз динамики и основных технических трендов в отрасли производства электромобилей за период с 1995 до 2025 года"

10. Сильвестрова В.А., студент РГАУ-МСХА им.К.А.Тимирязева "Особенности годового хода и пространственного распределения потоков CO₂ и CH₄ на территории России по данным спутника GOSAT"

11. Скафарик А.И., аспирант географического ф-та МГУ "Оценка эффективности использования солнечной микрогенерации для электро- и теплоснабжения в регионах РФ"

12. Скубачевская Н.Д., аспирант ИНП РАН, г. Москва "Принципы развития системы ценообразования на выбросы парниковых газов в России с учетом международного опыта".



Рис. 4. Награждение лауреатов конкурса лучших докладов.

Фото С.Е.Фрида

Некоторые доклады молодых учёных публикуются в этом выпуске журнала «Окружающая среда и энерговедение». Отметим, что на страницах журнала освещались ранее итоги XII Школы 2020 года [5] и XIII Школы 2022 года [6]; ряд статей молодых ученых-участников Школ также был опубликованы в журнале.

Благодарность. Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова "Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды"

Литература

1. XIV научная молодежная школа «Возобновляемые источники энергии. Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике» — 21-22 ноября 2024 г. URL: <http://jeees.ru/2024/09/06/xiv-научная-молодежная-школа-возобнов/>

2. Фёдоров В.М. Соллярная теория изменений климата // *Окружающая среда и энергоснабжение*. – 2021. - №2. – с. 78-95.
3. Бабурич В.Л. Энергетика и развитие России // *Окружающая среда и энергоснабжение*. – 2024. - №2. – с. 4-13.
4. Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике: сборник докладов Школы молодых ученых / составители: Т.В. Новикова (ИНЭИ РАН), С.В. Киселева (МГУ им. М.В. Ломоносова), Ю.Ю. Рафикова (МГУ им. М.В. Ломоносова). — Москва: ИНЭИ РАН, 2024. — 307 с. : ил.
5. Залиханов М.Ч., Дегтярев К.С. Всероссийская научная конференция и XII научная молодежная школа «Возобновляемые источники энергии» // *Окружающая среда и энергоснабжение*. – 2020. - №4. – с. 4-5.
6. Дегтярев К.С., Рафикова Ю.Ю. Всероссийская научная молодежная школа с международным участием «Возобновляемые источники энергии и приоритеты научно-технологического развития энергетики России» // *Окружающая среда и энергоснабжение*. – 2022. - №4. – с. 4-9.

References

1. XIV All-Russian Youth Scientific School «Renewable Energy Sources. The Role of Renewable Energy for Transition to Carbon-Neutral Economy» - 21-22 November 2024. URL: <http://jees.ru/2024/09/06/xiv-научная-молодежная-школа-возобнов/>
2. Fedorov V.M. Solar Theory of Climate Change // *Journal of Environmental Earth and Energy Study*; 2021; 2; 78-95.
3. Baburin V.L. Energy Industry and Development of Russia // *Journal of Environmental Earth and Energy Study*; 2024; 2; 4-13.
4. Rol' vozobnovlyayemoy energetiki pri perekhode k uglerod-neytral'noy ekonomike: sbornik dokladov Shkoly molodykh uchenykh / sostaviteli: T.V. Novikova (INEI RAN), S.V. Kiseleva (MGU im. M.V. Lomonosova), YU.YU. Rafikova (MGU im. M.V. Lomonosova). — Moskva : INEI RAN, 2024. — 307 s. : il.
5. Zalikhanov M.Ch., Degtyarev K.S. All-Russian Scientific Conference and XII Junior Scientific School “Renewable Energy Sources” // *Journal of Environmental Earth and Energy Study*; 2020; 4; 4-5.
6. Degtyarev K.S., Rafikova Yu.Yu. All-Russian Youth Scientific School “Renewable Energy Sources and Priorities for Scientific and Technological Development of Russian Energy Industry” // *Journal of Environmental Earth and Energy Study*; 2022; 4; 4-9.

All-Russian Youth Scientific School with International Participation “Renewable Energy Sources. The Role of Renewable Energy for Transition to Carbon-Neutral Economy”

¹ Kirill Degtyarev, ² Yuliya Rafikova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: ¹ kir1111@rambler.ru, ² ju.rafikova@mail.ru

Abstract. The article informs about the All-Russian scientific youth school dedicated to renewable energy - "Renewable energy sources. The role of renewable energy in the transition to a carbon-neutral economy", held at the Geography Faculty of Lomonosov Moscow State University on 20-23th November 2024. The lectures, reports, main directions and issues of the conference are considered, reflecting the situation with the directions of renewable energy development in Russia and in the world, an assessment of the role of renewable energy in the decarbonization of the economy, an assessment of the consequences of an increase in the share of renewable energy in electricity production.

Keywords: conference, research school, education, young scientists, renewable energy, geography of energy, hydro, bioenergy, wind energy, electric vehicles, solar energy, energy storage, carbon balance.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University "The future of the planet and global environmental changes".

УДК 338.51

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-4-62-72

EDN: CNOLCQ

Модельная оценка экономических последствий декарбонизации электроэнергетики

Аликин Руслан Олегович ^[0000-0003-0210-8296]

Институт энергетических исследований РАН, Москва, 117186, Россия

E-mail: ruslanalikin@bk.ru

Аннотация. Глобальные экологические инициативы, в которых Россия принимает участие, подразумевают декарбонизацию национальной экономики. Электроэнергетика является наиболее перспективным сектором экономики с точки зрения технологической реализуемости снижения выбросов CO₂. Однако, из-за особенностей механизма ценообразования на оптовом рынке электроэнергии России интенсивный рост безуглеродных мощностей в структуре производства может привести к снижению спотовой (почасовой) цены на «рынке на сутки вперед» (РСВ). Это обусловлено тем, что новые безуглеродные мощности будут замещать более дорогие традиционные источники энергии, замыкающие баланс и формирующие цену. Снижение спотовой цены негативно скажется на окупаемости действующих и запланированных проектов. В статье выполнена оценка ценовых последствий реализации различных сценариев декарбонизации в российской электроэнергетике. Основной фокус сделан на оценку уровня равновесных цен оптового рынка энергии при увеличении мощности разных типов безуглеродных электростанций (АЭС, ВЭС и СЭС) и безусловном выполнении условий надежного энергоснабжения. Представленные количественные экономические оценки получены с помощью разработанного в ИНЭИ РАН модельного инструментария для коммерческой диспетчеризации генерирующих мощностей, имитирующего механизм ценообразования на оптовом рынке электроэнергии.

Ключевые слова: моделирование, режимы потребления, электроэнергетика, декарбонизация, спотовая цена, парниковые газы.

1 Введение

В ЕЭС России производственная база электроэнергетики формировалась преимущественно технологиями традиционной диспетчируемой генерации. Однако, в последние годы задача декарбонизации энергетики выходит на первый план в

долгосрочных стратегиях развития экономик многих стран, включая Россию. Так, в Климатической доктрине РФ обозначена долгосрочная цель по достижению углеродной нейтральности к 2060 году.

На данный момент, в ЕЭС России, безуглеродные источники энергии, включая АЭС и ГЭС, составляют около 35% установленной мощности, обеспечивая 37% производства электроэнергии [1]. Целевым показателем для ядерной энергетики является увеличение доли производства электроэнергии до 25% к 2045 году [2].

Ввод больших объемов безуглеродной генерации оказывает существенное влияние на экономическую эффективность функционирования субъектов энергосистемы, снижая спотовые цены на электроэнергию [3].

2 Инструменты и методы

В ходе исследования в ИНЭИ РАН была разработана Модель комплексной коммерческой оптимизации (МОККО). Программный комплекс МОККО обеспечивает компьютерную реализацию математической оптимизационной модели коммерческой диспетчеризации электроэнергетики [4].

Программа позволяет пользователю определять экономически оптимальный режим работы моделируемых объектов электроэнергетики, задавать уровень их агрегирования для представления в виде переменных ЛП-задачи, устанавливать взаимосвязи между ними, а также задавать ограничения на условия их функционирования в виде системы уравнений.

Однако помимо решения классической (прямой) задачи по оптимизации использования мощности электростанций в почасовых балансах, применение таких моделей позволяет исследовать изменение профиля спотовой цены на основе решения двойственной задачи линейного программирования.

Валидация модели МОККО была проведена для отчетного (2021) года и для мульти узлового представления ЕЭС России в виде 6 синхронных ОЭС с расчетом на модели FlexTool модель (IRENA) [5]. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты валидации модели МОККО, [4]

Показатель	FlexTool	МОККО	Разница %
Целевая функция, млн. руб	688185,8	688290,8	-0,015%
Спотовая цена ОЭС Центра, руб/МВт·ч	1388,1	1389,8	-0,119%
Спотовая цена ОЭС Северо-запада, руб/МВт·ч	1354,3	1355,6	-0,093%
Спотовая цена ОЭС Средней Волги, руб/МВт·ч	1308,9	1316,7	-0,598%
Спотовая цена ОЭС Урала, руб/МВт·ч	1195,7	1198,4	-0,226%
Спотовая цена ОЭС Юга, руб/МВт·ч	1366,6	1371,8	-0,379%
Спотовая цена ОЭС Сибири, руб/МВт·ч	846,9	869,3	-2,643%

3 Результаты анализа

Введение новых безуглеродных мощностей, имеющих несопоставимо более низкие топливные затраты приведет к изменению равновесной цены, которая будет определяться переменными затратами уже другого, более дешевого поставщика, замыкающего баланс при новых условиях. Переход к новой точке рыночного равновесия снизит спотовую цену и негативно скажется на окупаемости реализуемых и планируемых в будущем проектов (Рис. 1).

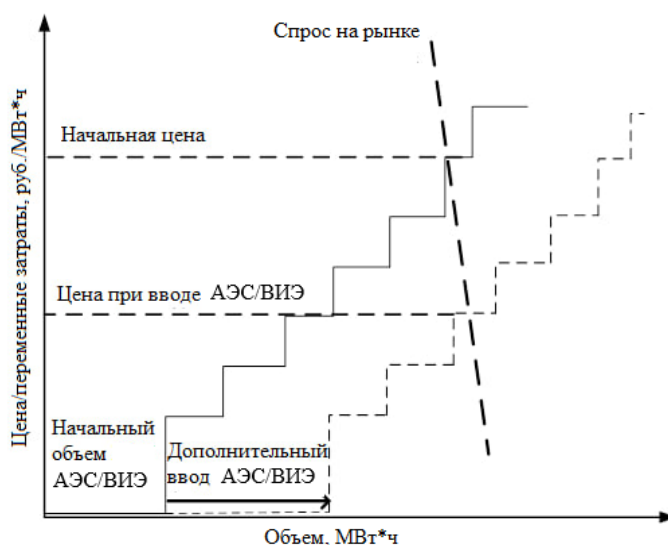


Рис. 1. Влияние вводов безуглеродных технологий на спотовую цену электроэнергии (составлено автором на основе, [3])

Таким образом, помимо проблем, связанных с гибкостью энергосистемы [6], увеличение доли безуглеродных источников оказывает существенное влияние на конкурентное ценообразование. Этот эффект наглядно проявляется в энергосистемах Европы [7], где доля ВИЭ-электростанций является одной из самых высоких в мире.

Как показало исследование [3], прослеживается четкая взаимосвязь между снижением цены на спотовом рынке электроэнергии и приростом доли низкоуглеродных источников энергии. Феномен, когда каждая новая введенная единица мощности ухудшает ценовые условия для окупаемости следующих вводимых мощностей, получил название эффекта «ценового каннибализма» [8].

В России спотовый рынок электроэнергии называется «рынок на сутки вперед» (РСВ). В основе его работы лежит почасовая оптимизация состава загружаемых генерирующих мощностей по переменным (топливным) затратам. Так формируется кривая оптимального предложения электроэнергии. Цена электроэнергии на каждый час определяется переменными (топливными) затратами электро-

станции, замыкающей баланс спроса и предложения в каждом узле энергосистемы. В данном докладе феномен «ценового каннибализма» исследован применительно к условиям функционирования ЕЭС России и рынка «на сутки вперед» в 2021 году. При этом в качестве «возмущающего» фактора рассмотрен дополнительный рост мощностей АЭС, ВЭС и СЭС. Полученные оценки ценовых последствий отображены в таблицах 2, 3 и 4.

Таблица 2. Анализ ценовых последствий в сценариях увеличения мощности АЭС

	Сценарии				
	1	2	3	4	5
Дополнительная мощность ВЭС ГВт	0	2,5	5,0	7,5	10,0
Спотовая цена электроэнергии, руб./МВт·ч					
Первая ЦЗ в целом	1321,6	1294,1	1260,8	1226,8	1187
ОЭС Юга	1385,3	1353,8	1322,8	1278,8	1227,6
ОЭС Урала	1208,2	1195,1	1177,4	1162,3	1146,9
ОЭС Средней Волги	1319,2	1281,9	1242,4	1213,4	1175,5
ОЭС Северо-Запада	1359	1325,2	1281,1	1238,7	1186,9
ОЭС Центра	1398,7	1364,8	1321,3	1272,7	1216,6
Изменение спотовой цены, в % относительно сценария 1					
Первая ЦЗ в целом	0	-2,1	-4,8	-7,7	-11,3
ОЭС Юга	0	-2,3	-4,7	-8,3	-12,8
ОЭС Урала	0	-1,1	-2,6	-3,9	-5,3
ОЭС Средней Волги	0	-2,9	-6,2	-8,7	-12,2
ОЭС Северо-Запада	0	-2,6	-6,1	-9,7	-14,5
ОЭС Центра	0	-2,5	-5,9	-9,9	-15,0
Изменение годовых затрат на производство электроэнергии, в % относительно сценария 1					
	0	-2,9	-5,8	-8,5	-11,1

Таблица 3. Анализ ценовых последствий в сценариях увеличения мощности ВЭС

	Сценарии				
	1	2	3	4	5
Дополнительная мощность ВЭС ГВт	0	2,5	5,0	7,5	10,0
Спотовая цена электроэнергии, руб./МВт·ч					
Первая ЦЗ в целом	1321,2	1310,4	1300,5	1290,7	1280,5
ОЭС Юга	1385	1353,1	1327,6	1300,6	1266,8
ОЭС Урала	1208	1206,4	1201,4	1195,8	1190,1
ОЭС Средней Волги	1319	1300,3	1286,5	1271,2	1257,6
ОЭС Северо-Запада	1359	1351,8	1346,2	1341,6	1336,9
ОЭС Центра	1399	1390,1	1382,5	1376,8	1371,7
Изменение спотовой цены, в % относительно сценария 1					
Первая ЦЗ в целом	0	-0,8	-1,6	-2,3	-3,1
ОЭС Юга	0	-2,3	-4,2	-6,1	-8,6
ОЭС Урала	0	-0,1	-0,6	-1,0	-1,5
ОЭС Средней Волги	0	-1,4	-2,5	-3,6	-4,7
ОЭС Северо-Запада	0	-0,5	-0,9	-1,3	-1,6
ОЭС Центра	0	-0,6	-1,2	-1,6	-1,9

Изменение годовых затрат на производство электроэнергии, в % относительно сценария 1	0	-1,15	-2,28	-3,39	-4,47
--	---	-------	-------	-------	-------

Таблица 3. Анализ ценовых последствий в сценариях увеличения мощности СЭС

	Сценарии				
	1	2	3	4	5
Дополнительная мощность СЭС ГВт	0	2,5	5,0	7,5	10,0
Спотовая цена электроэнергии, руб./МВт·ч					
Первая ЦЗ в целом	1321,2	1313,5	1308,9	1304,1	1302,2
ОЭС Юга	1385	1365,2	1355,6	1341,5	1336,1
ОЭС Урала	1208	1205,1	1200,8	1197,8	1195,3
ОЭС Средней Волги	1319	1304,2	1295,6	1288,3	1285,9
ОЭС Северо-Запада	1359	1354,5	1352,6	1351,0	1350,6
ОЭС Центра	1399	1393,6	1391,7	1389,4	1389,2
Изменение спотовой цены, в % относительно сценария 1					
Первая ЦЗ в целом	0	-0,6	-0,9	-1,3	-1,4
ОЭС Юга	0	-1,5	-2,1	-3,2	-3,5
ОЭС Урала	0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,1
ОЭС Средней Волги	0	-1,1	-1,8	-2,3	-2,5
ОЭС Северо-Запада	0	-0,3	-0,5	-0,6	-0,6
ОЭС Центра	0	-0,4	-0,5	-0,7	-0,7
Изменение годовых затрат на производство электроэнергии, в % относительно сценария 1	0	-0,74	-1,47	-2,18	-2,89

Во всех рассмотренных сценариях можно заметить почти линейный тренд на снижение значений как целевой функции модели (общая сумма затрат на производство электроэнергии), так и средневзвешенных за год спотовых цен электроэнергии. Ценовой эффект сильнее выражен при интеграции АЭС в энергосистему (Рис. 2). Обусловлено это более высоким КИУМ АЭС по сравнению с ВЭС и СЭС, и как следствие большим количеством «дешевых» кВт*ч на единицу установленной мощности.

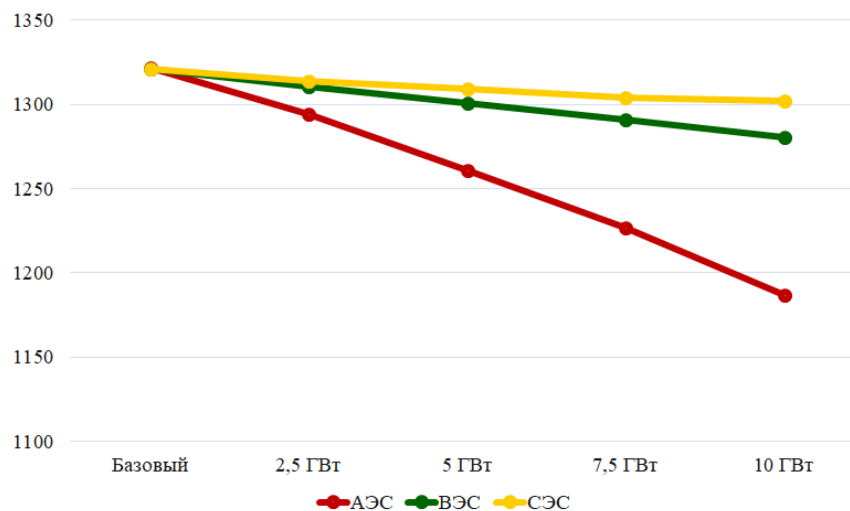


Рис. 2. Ценовые последствия расширения безуглеродных мощностей в первой ЦЗ

Наибольшее развитие ВЭС и СЭС получили в ОЭС Юга. Именно для этой относительно небольшой части ЕЭС России, эффект ценового каннибализма исследован более тщательно. В частности, при параметрическом увеличении мощности ВЭС или СЭС проанализировано изменение не только спотовой цены электроэнергии, но и выручки разных типов электростанций. На рисунках 3 и 4 представлено изменение абсолютной выручки электростанций.

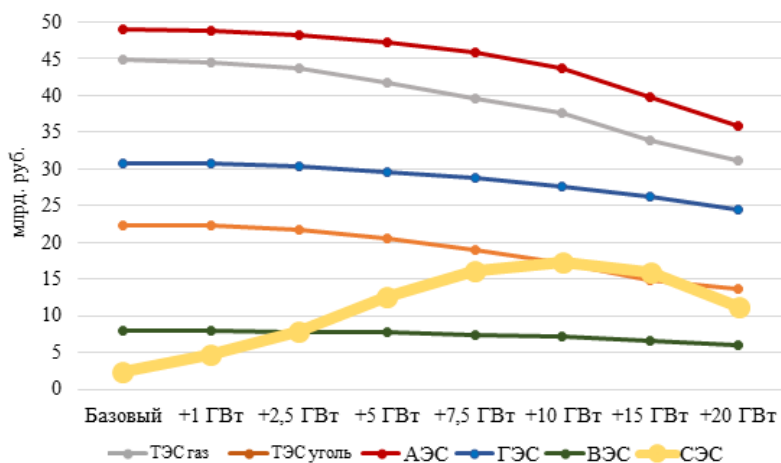


Рис. 3. Изменение выручки электростанций для различных сценариев вводов мощностей СЭС в ОЭС Юга, [9]

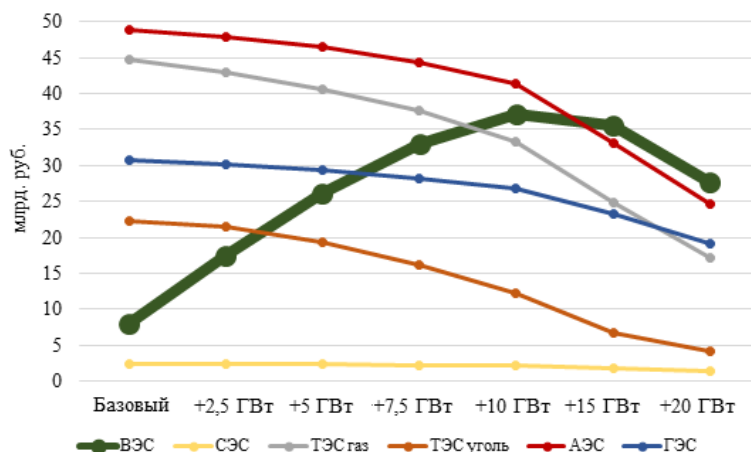


Рис. 4. Изменение выручки электростанций для различных сценариев вводов мощностей ВЭС в ОЭС Юга, [10]

Важным эффектом является нелинейный характер изменения выручки ВИЭ. В сценариях подразумевающих ввод до 10 ГВт ВИЭ в ОЭС Юга, общий объем выручки всех типов электростанций, за исключением ВИЭ, снижается. В сценариях с вводом более 10 ГВт ВИЭ тенденция снижения выручки традиционных электростанций сохраняется, однако и выручка ВИЭ также начинает снижаться. Это можно объяснить более быстрым снижением равновесной цены РСВ по причине существенного увеличения доли станций с низкими переменными издержками в структуре генерации.

Также при введении более 10 ГВт ВИЭ в ОЭС Юга некоторые мощности остаются невостребованными в часы пикового производства ВИЭ, в следствие чего происходит их принудительное отключение, то есть снижение среднего КИУМ. Следовательно, для каждой энергосистемы существует такой объем мощностей ВИЭ, больше которого, при существующей структуре мощностей, экономически нецелесообразно наращивать мощности ВИЭ, поскольку это будет уменьшать их общую выручку.

В современных условиях окупаемость и возврат инвестиций в проектах безуглеродной генерации только частично осуществляется за счет выручки на спотовом рынке, остальная же часть обеспечивается дополнительными механизмами поддержки. В России такая поддержка в рамках обеспечивается через механизм договоров о предоставлении мощности (ДПМ) за счет специальных тарифов на мощность.

При снижении спотовой цены электроэнергии, для обеспечения экономической эффективности и достижения цены окупаемости, доля платежа за мощность в выручке безуглеродных технологий должна быть увеличена. Таким образом, реализация той или иной программы развития АЭС или ВИЭ-электростанций сопровождается снижением спотовой цены и ростом объемов дополнительной тарифной поддержки для этих проектов [8].

4 Выводы

Все более значимую роль в национальных стратегиях развития экономики играют эколого-климатические соображения, стимулирующие переход к низкоуглеродной технологической структуре электроэнергетики. Интеграция больших объемов безуглеродных источников энергии, может привести к снижению спотовых цен электроэнергии и, как следствие, к ухудшению окупаемости энергетических проектов в условиях конкурентного рынка.

Для полноценного исследования этой проблемы необходим комплексный подход, включающий многоступенчатое моделирование с применением нескольких инструментов, включая как модели развития, так и коммерческой диспетчеризации мощностей.

Разработанная в ИНЭИ РАН модель коммерческой диспетчеризации позволяет на основе решения двойственной задачи линейного программирования определить масштабы изменений в профиле спотовой цены электроэнергии и выручке поставщиков. Такая постановка задачи открывает возможность исследования экономических последствий реализации различных сценариев декарбонизации энергетики.

Выполненный с помощью модели МОККО анализ функционирования ЕЭС России показал, что внедрение достаточно больших мощностей АЭС или ВИЭ может заметно понизить уровень спотовых цен и как следствие потребовать расширения вне рыночных механизмов компенсации вложений в безуглеродные источники.

Благодарность. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30013)

Литература

1. Системный оператор ЕЭС России, 2022 [Электронный ресурс] – URL: <https://www.sops.ru/functioning/ups/ups2022/>. (дата обращения 10.10.2024)
2. Департамент коммуникаций Электроэнергетического дивизиона Госкорпорации «Росатом». [Электронный ресурс] – URL: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/rosatom-dosrochno-vypolnil-gosudarstvennoe-zadanie-po-vyrobke-elektroenergii/> (дата обращения 10.10.2024)
3. Веселов Ф.В., Ерохина И.В., Никулина Е.А., Моделирование ценовых последствий на конкурентном рынке электроэнергии в России интенсивном развитии неуглеродных электростанций // 13-я международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (Москва, 28–30 сентября 2020 года) С. 156-164.
4. Аликин Р.О., Городилов М. А., Люшнин Л.С., Модель комплексной коммерческой оптимизации энергосистем МОККО // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции

- (Кемерово, 6 – 8 декабря 2023 г.). – Кемерово: КузГТУ, 2024. – С. 204.1-204.6. [Электронный ресурс] – URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2023/energ/pages/Articles/204.pdf>
5. IRENA (2018) Power system flexibility for the energy transition [Электронный ресурс] – URL: <https://www.irena.org/publications/2018/Nov/Power-system-flexibility-for-the-energy-transition> (дата обращения 10.02.2024).
 6. Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество, 2020, № 7, С. 12–21. DOI:10.24160/0013-5380-2020-7-12-21
 7. Рехарк, The Cannibalization Effect: Behind the Renewables' Silent Risk [Электронный ресурс] – URL: <https://pexarark.com/blog/cannibalization-effect-renewables/> (дата обращения 10.10.2024)
 8. Jones M., Rothenberg F., ICIS The renewable cannibalisation problem: Why full merchant will become increasingly challenging, 2019. Электронный ресурс] – URL: <https://sdgresources.relx.com/sites/default/files/renewable-cannibalisation-white-paper.pdf> (дата обращения 10.10.2024)
 9. Городилов М. А., Аликин Р.О. «Анализ воздействия развития солнечной энергетики на функционирование энергосистем в южных регионах России» 78-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2024» РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, 22-26 апреля 2024
 10. Люшин Л.С., Аликин Р.О. Оценка влияния интенсивного развития ветроэнергетики на экономические условия работы электростанций и окупаемость новых энерго мощностей в Объединенной энергосистеме Юга» 78-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2024», РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, 22-26 апреля 2024

References

1. System operator UPS of Russia, 2024 Available at: <https://www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2024/>. Accessed 10 Oct 2024
2. Department of Communications of the Electric Power Division of the State Corporation "Rosatom". Available at: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/rosatom-dosrochno-vypolnil-gosudarstvennoe-zadanie-po-vyrabotke-elektroenergii/> (Accessed 10 Oct 2024)
3. Veselov F.V., Erokhina I.V., Nikulina E.A., Modeling price consequences in the competitive electricity market in Russia with intensive development of non-carbon power plants // 13th international conference "Management of the development of large-scale systems" (Moscow, September 28-30, 2020) P. 156-164
4. Alikin R.O., Gorodilov M.A., Lyushnin L.S., Model of complex commercial optimization of energy systems MOCCO // Power engineering and energy saving: theory and practice. Collection of materials of the VIII International scientific and practical conference (Kemerovo, December 6-8, 2023). - Kemerovo: KuzSTU, 2024. - P. 204.1-204.6., Available at: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2023/energ/pages/Articles/204.pdf>, Accessed 10 Oct 2024
5. IRENA (2018) Power system flexibility for the energy transition, Available at: <https://www.irena.org/publications/2018/Nov/Power-system-flexibility-for-the-energy-transition>, Accessed 10 Oct 2024
6. Voropai N.I. Directions and problems of transformation of electric power systems // Electricity, 2020, No. 7, pp. 12–21. DOI:10.24160/0013-5380-2020-7-12-21

7. Pexapark, The Cannibalization Effect: Behind the Renewables' Silent , Available at: <https://pexapark.com/blog/cannibalization-effect-renewables/> Accessed 10 Oct 2024
8. Jones M., Rothenberg F., ICIS The renewable cannibalisation problem: Why full merchant will become increasingly challenging, 2019. , Available at: <https://sdgresources.relx.com/sites/default/files/renewable-cannibalisation-white-paper.pdf> Accessed 10 Oct 2024
9. Gorodilov M.A., Alikin R.O. "Analysis of the impact of solar energy development on the functioning of energy systems in the southern regions of Russia" 78th International Youth Scientific Conference "Oil and Gas - 2024" Russian State University of Oil and Gas «Gubkin University» (National Research University), Moscow, April 22-26, 2024
10. Lyushnin L.S., Alikin R.O. "Assessment of the impact of intensive development of wind energy on the economic conditions of operation of power plants and the cost recovery of new energy capacities in the United Energy System of the South" 78th International Youth Scientific Conference "Oil and Gas - 2024", Russian State University of Oil and Gas «Gubkin University» (National Research University), Moscow, April 22-26, 2024

Model Assessment of the Economic Consequences of Decarbonization of the Electric Power Industry

Ruslan Alikin ^[0000-0003-0210-8296]

Energy Research Institute RAS, Moscow, 117186, Russia

E-mail: ruslanalikin@bk.ru

Abstract. Global environmental initiatives in which Russia participates imply the decarbonization of the national economy. Electric power industry is the most promising sector of the economy in terms of the technological feasibility of reducing CO₂ emissions. However, due to the peculiarities of the pricing mechanism in the wholesale electricity market of Russia, the intensive growth of carbon-free capacities in the production structure may lead to a decrease in the spot (hourly) price for the "day ahead market" (RSV). This is due to the fact that new carbon-free capacities will replace more expensive traditional energy sources that close the balance and form the price. A decrease in the spot price will have a negative impact on the payback period of existing and planned projects. The article evaluates the price consequences of the implementation of various decarbonization scenarios in the Russian electric power industry. The main focus is on assessing the level of equilibrium prices of the wholesale energy market with an increase in the capacity of various types of carbon-free power plants (NPP, WPP and SPP) and unconditionally reliable energy supply. The presented quantitative economic estimates were obtained using a model toolkit developed at ERI RAS

for modelling commercial dispatching of generating capacities and simulating the pricing mechanism in the wholesale electricity market.

Keywords: Modeling, consumption modes, electric power industry, decarbonization, spot price, greenhouse gases

Acknowledgement. The study is supported by Russian Science Foundation grant (project № 21-79-30013)

УДК 621.311.243:621.311.001.57

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-4-73-84

EDN: KGHFXM

Моделирование зарядных и разрядных характеристик аккумуляторных батарей на основе натуральных данных

^{1, 1} Андреева Ксения Александровна [0009-0000-4666-6623],^{1, 2} Васков Алексей Геннадьевич [0000-0003-4664-8008],^{1, 3} Айнуллоева Инора Назмуллоевна [0009-0000-3550-5816],^{1, 4} Романюк Никита Сергеевич [0009-0000-5769-5091]¹ Научно-исследовательский университет МЭИ, Россия, МоскваE-mail: ¹ AndreevaXA@mpei.ru, ² VaskovAG@mpei.ru,³ AinulloyevaIN@mpei.ru, ⁴ RomaniukNS@mpei.ru

Аннотация. В современном мире в удаленных и труднодоступных районах строится большое количество автоматизированных гибридных энергетических комплексов, имеющих в своем составе дизельную электростанцию (ДЭС) и электростанцию на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), зачастую солнечные электростанции (СЭС). Однако, из-за стохастического характера выработки СЭС, для надежной работы гибридной системы необходимо дополнительно использовать систему накопления энергии (СНЭ), а также прогнозировать режим работы комплекса. В данной работе было проведено исследование по моделированию зарядных и разрядных характеристик СНЭ по натурным данным, полученным на опытном полигоне НИУ МЭИ, для возможности обеспечения более точного прогнозирования режима работы СНЭ в составе солнечно-дизельного комплекса.

Ключевые слова: солнечно-дизельный комплекс, система накопления энергии, моделирование, планирование режима.

1 Введение

Все чаще в удаленных и труднодоступных районах России (северная часть Красноярского края, северная часть Якутии, Камчатский край) строятся новые гибридные энергетические комплексы или модернизируются старые дизельные

станции. Для этого устанавливаю источники генерации на основе возобновляемых источников энергии (солнечные или ветряные станции), а также системы накопления энергии. Надежная работа таких гибридных энергетических комплексов обеспечивается за счет использования прогнозирования режима работы на сутки вперед. Для этого необходимо знать и уметь рассчитывать параметры каждого элемента комплекса, в особенности системы накопления энергии, включающей в себя батарею аккумуляторов. Точная и надежная оценка состояния заряда аккумулятора позволяет корректно проводить управление гибридной системой в целом, а также более точно рассчитывать прогноз работы системы накопления энергии (СНЭ) в составе солнечно-дизельного комплекса (СДК).

Работа СНЭ имеет ограничения, связанные с невозможностью бесконечно разряжать или заряжать АКБ, так как это может привести к отрицательным последствиям, а иногда и к необратимым процессам в самих батареях. Также чрезмерный перезаряд может послужить причиной аварии, в ходе которой аккумуляторные батареи могут взорваться. К таким ограничениям можно отнести ограничение по емкости аккумуляторной батареи (АКБ) (Сдост), а также ограничение на значения мощностей заряда и разряда АКБ ($N_{зар}/N_{разр}$) [1]. Однако этих параметров недостаточно для точного прогнозирования работы СНЭ. Дополнительно необходимо иметь возможность определять скорость заряда и разряда СНЭ, чтобы более точно определять уровень заряда батареи в конце расчетного периода времени.

Различными исследователями предложено большое количество методов, по оценке уровня заряда батареи [2-15]. Но многие из них мало применимы на практике, так как используют дополнительные встраиваемые системы, или дают большую погрешность в измерениях.

2 Материальная база

На базе макета СДК НИУ «МЭИ» (рис. 1) был проведен ряд испытаний совместной работы солнечно-дизельной станции и системы накопления энергии с целью получения зависимостей, определяющих ограничения на скорость заряда и разряда СНЭ.

Первая группа испытаний включала в себя разряд аккумуляторов с постоянной мощностью с промежуточной дозарядкой до 100%. Для этого на совместную работу включались СНЭ, инвертор, включающий в себя зарядное устройство (ЗУ), и нагрузочный модуль (НМ). Ограничение по разрядной мощности задавалось с помощью уставок, выставляемых при помощи внешнего приложения НМ и системы SCADA.

Вторая группа испытаний проводилась для различных мощностей заряда АКБ. В процессе использовались только сеть, СНЭ и инвертор. Ограничение зарядной мощности было произведено токовой уставкой ЗУ. Для используемых батарейных инверторов минимальная возможная уставка тока разряда составляет 10 А,

что соответствует 3,7 кВт зарядной мощности. Было проведено четыре испытания с разными значениями зарядных мощностей, между которыми аккумуляторные батареи (АКБ) разряжались с помощью НМ до 55-60%.



Рис. 1. Макет солнечно-дизельного комплекса НИУ «МЭИ»

3 Определение скорости разряда

В ходе эксперимента по определению скорости разряда СНЭ осуществлялся постоянный мониторинг четырех показателей на СНЭ – мощность (P), с которой разряжалась батарея, разрядный ток (I) и напряжение (U), а также уровень заряда (SOC). Интересующие значения уровня заряда были построены в виде графика, представленного на рисунке 2.

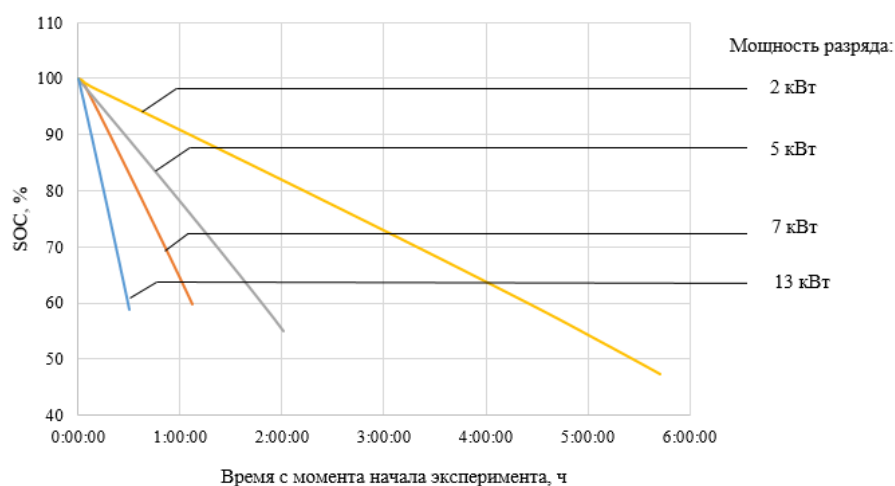


Рис. 2. Уровень заряда АКБ

Визуальный анализ полученной зависимости показывает, что она может быть аппроксимирована линейной функцией. На рисунке 3 можно увидеть, что прямые, полученные опытным путем и построенные по аппроксимирующей формуле очень близки. Максимальное отклонение от опытных данных составило всего 0,65%.

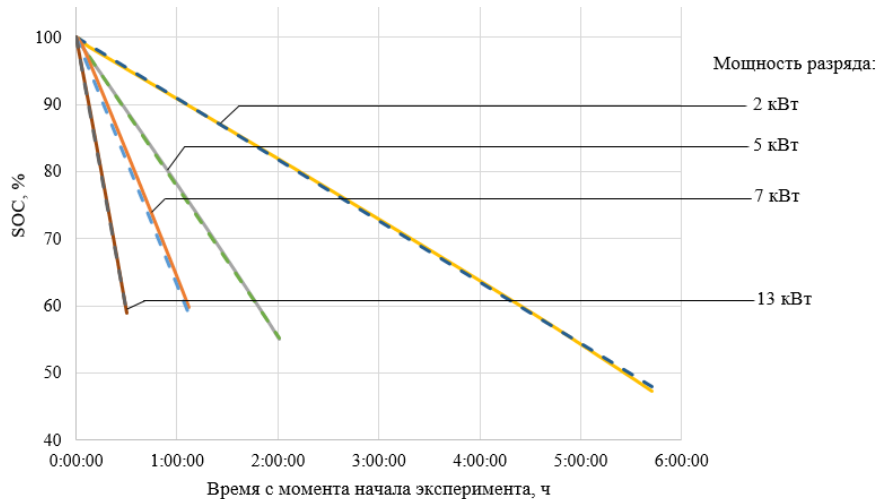


Рис. 3. Сравнение данных, полученных опытным и теоретическим путями

Если рассматривать полученные функции как стандартные уравнения линейной зависимости (табл. 1), то видно, что правая часть всех уравнений отличается только угловым коэффициентом. Из этого можно сделать вывод, что возможно построить зависимость этого коэффициента от мощности разряда (рис. 4).

Таблица 1. Полученные уравнения линейной аппроксимации

Разрядная мощность	Уравнение прямой
2 кВт	$\Delta SOC = - 218,8 \cdot \Delta t + SOC_0$
5 кВт	$\Delta SOC = - 532,91 \cdot \Delta t + SOC_0$
7 кВт	$\Delta SOC = - 886,99 \cdot \Delta t + SOC_0$
13 кВт	$\Delta SOC = - 1946,9 \cdot \Delta t + SOC_0$

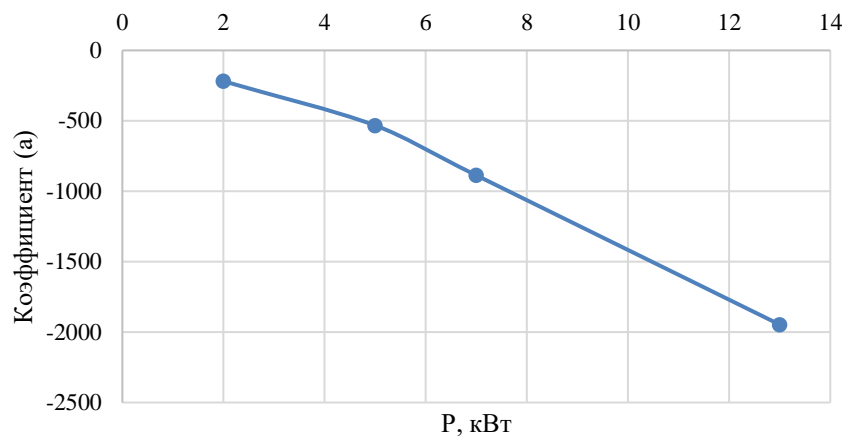


Рис. 4. Зависимость коэффициента а от мощности разряда батареи

Полученная зависимость уже не линейная, поэтому для аппроксимации ее функции необходимо использовать полиномиальную линию тренда. На графике (рис. 5) представлены два варианта выбора полинома для данной кривой.

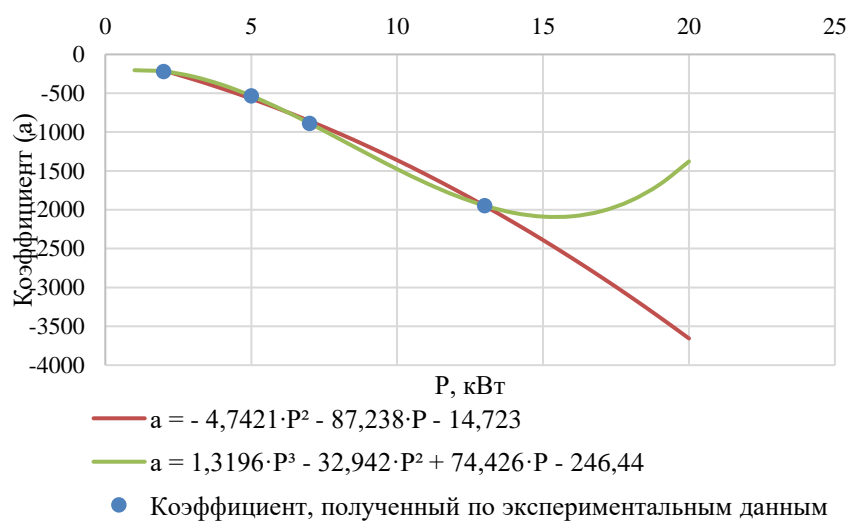


Рис. 5. Зависимость коэффициента а от значения мощности разряда

В первом варианте рассматривается полином второй степени. Расхождение между точками от 0,17 до 6,86 %. Во втором варианте рассматривается полином

третьей степени. Максимальное отклонение 0,002%. Второй вариант дает меньшее отклонение от экспериментальных точек, однако, при построении на одном графике обоих полиномов на больший диапазон значений мощности разряда, понятно, что полином третьей степени дает недостоверный результат при больших мощностях. Соответственно, для моделирования необходимо использовать полином второй степени.

Таким образом, вычислить уровень заряда при разряде АКБ можно по формулам (1).

$$\begin{cases} SOC_i = \Delta SOC + SOC_{i-1} \\ \Delta SOC = a \cdot \Delta t \\ a = -4,7421 \cdot P^2 - 87,238 \cdot P - 14,723 \end{cases} \quad (1)$$

4 Верификация математической модели

Для проверки полученной модели расчета уровня заряда АКБ на практике было проведено испытание, в ходе которого моделировалась межсезонная нагрузка. Для этого были взяты данные характерных суток действующего солнечно-дизельного комплекса в Верхоянске и промасштабированы до значений, которые возможно протестировать на макете СДК НИУ «МЭИ» (рис. 6). Каждый час моделировался в течение 2 минут.

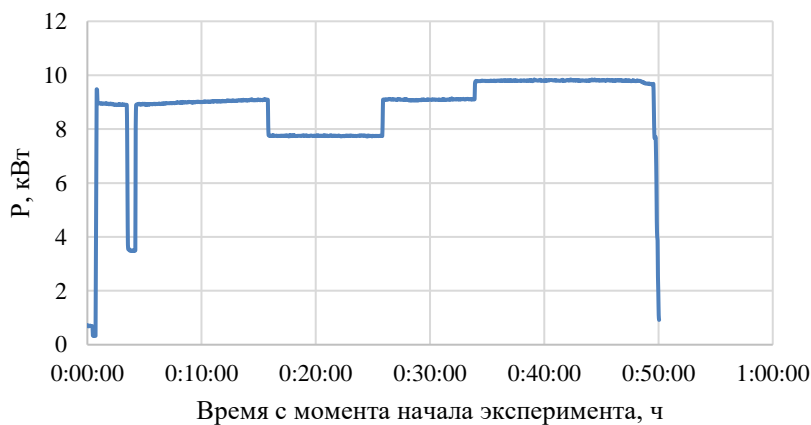


Рис. 6. Мощность, обеспечиваемая СНЭ

После этого были просчитаны угловые коэффициенты и уровень заряда в течении работы комплекса по заданному графику нагрузки. На большей части диапазона экспериментальные значения полностью совпадают с теоретическими. Однако, ближе к концу эксперимента АКБ разряжается чуть быстрее, чем по теоретическим расчетам. Максимальное отклонение от опытных данных составило 0,6%, а среднеквадратичное отклонение 0,18%.

Полученное отклонение незначительно, что позволяет сделать вывод, что полученные формулы можно использовать для проведения расчетов уровня заряда аккумуляторной батареи при прогнозировании работы СДК на сутки вперед.

5 Определение скорости заряда и верификация

Полученное отклонение незначительно, что позволяет сделать вывод, что полученные формулы можно использовать для проведения расчетов уровня заряда аккумуляторной батареи при прогнозировании работы СДК на сутки вперед.

Аналогично нахождению скорости разряда АКБ, проводились испытания и анализ для получения скорости заряда аккумуляторных батарей. Полученные уравнения (2) представлены ниже.

$$\begin{cases} SOC_i = \Delta SOC + SOC_{i-1} \\ \Delta SOC = a \cdot \Delta t \\ a = -2,6382 \cdot P^2 + 130,67 \cdot P - 7,5352 \end{cases} \quad (2)$$

Однако при верификации уравнений (рис. 7) были получены расхождения. Это может быть вызвано тем, что вывод формулы проводился при заряде постоянной мощностью и не учитывал свойство зарядного устройства со временем менять режим заряда, уменьшая скорость заряда в зависимости от уровня заряда АКБ. Для увеличения точности расчетов по формулам, было принято решение подобрать коэффициенты, учитывающие это влияние.

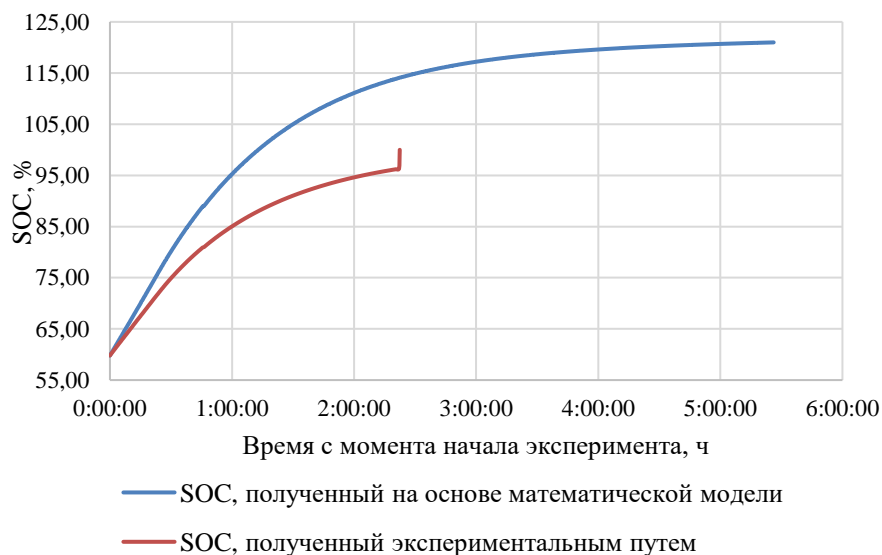


Рис.7. Уровень заряда СНЭ

Для начала были выбраны диапазоны, в зависимости от которых будет меняться коэффициент – начиная от 50% уровня заряда до 100% и с шагом в 10%. Начальный коэффициент в 50% был принят из показателя напряжения, который при меньших значениях уровня заряда снижался до недопустимых значений. В зависимости от начального уровня заряда каждой итерации подбирался такой коэффициент уменьшения мощности, чтобы теоретически посчитанная кривая максимально близко приближалась к экспериментальной кривой и суммарное среднеквадратичное отклонение составляло не более 0,5. Подобранные коэффициенты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты, учитывающие влияние уровня заряда на скорость заряда АКБ

Уровень заряда АКБ	Коэффициент
50-60 %	1
60-70 %	0,75
70-80 %	0,7
80-90 %	0,65
90-100 %	0,6

Как видно из графиков приведенный расчет совпадает с экспериментальным графиком, однако после 96,3% уровень батареи резко возрастает до 100%, а расчетный график продолжает постепенно возрастать в течение времени до 100%. Скорее всего такой скачек экспериментальных данных возникает из-за деградационных процессов внутри АКБ. Если рассматривать график до этого момента, то среднеквадратичное отклонение составляет 0,13, а с учетом резкого возрастания – 0,24.

Далее был проведен опыт, который учитывает и заряд, и разряд. Полученные результаты представлены на рисунке 8.

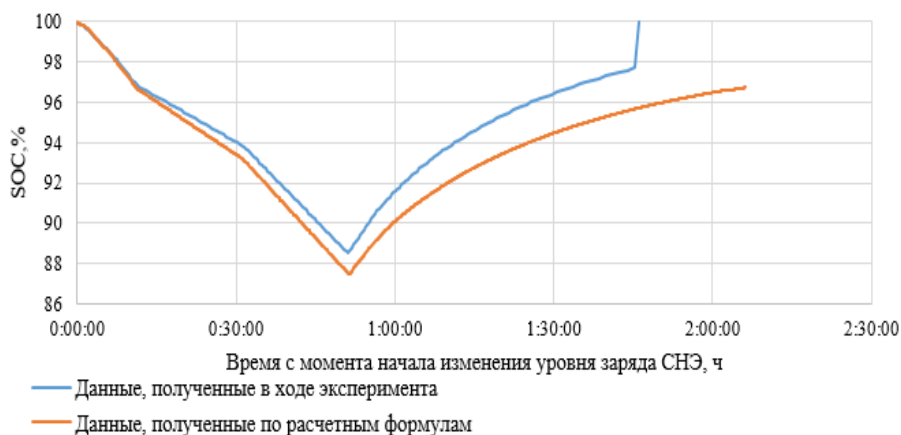


Рис. 8. Уровень заряда СНЭ

Как видно, со временем погрешность расчета растет. В данном случае максимальная погрешность составила 2%, что допустимо для использования данных

формул при прогнозировании режима работы. Однако при прогнозировании расчет выполняется каждый час, в ходе которого снимаются данные с работающего оборудования. В таком случае погрешность для ближайшего часа нарастает уже не так сильно (рис 9-10).

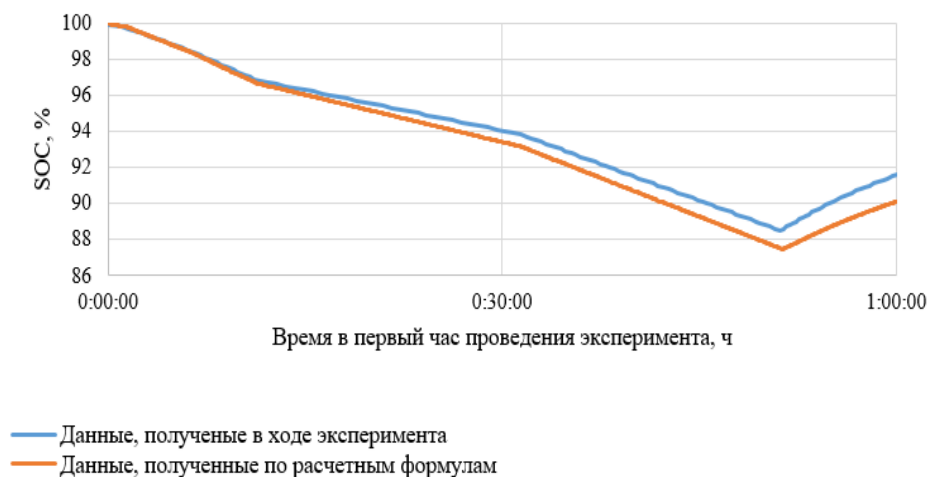


Рис. 9. Уровень заряда СНЭ в первый час эксперимента

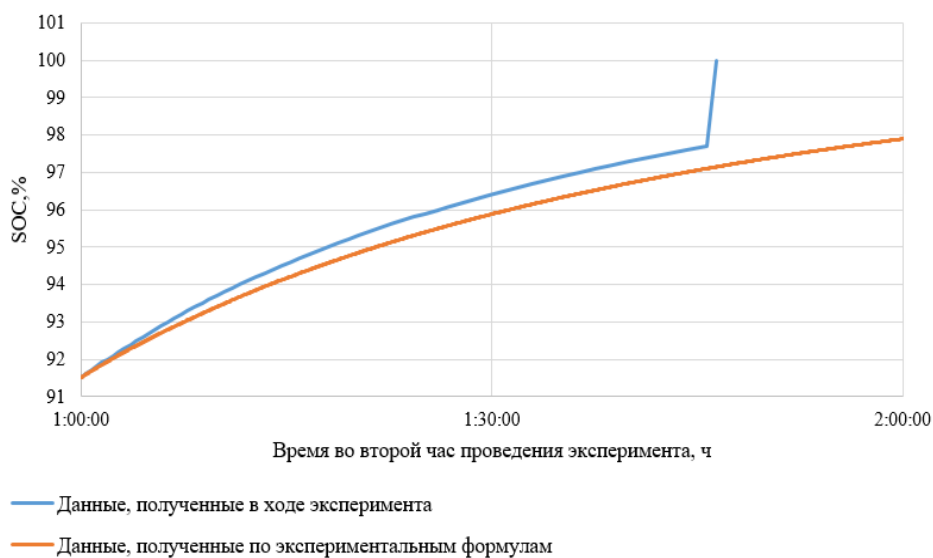


Рис. 10. Уровень заряда СНЭ во второй час эксперимента

Как видно из графиков, в пределах часа погрешность изменяется от 0,6% (второй час) до 1,5% (первый час). Соответственно можно сделать вывод что полученные формулы могут использоваться для конкретных целей краткосрочного прогнозирования даже с учетом роста погрешности во времени.

6 Выводы

Полученные в ходе исследования формулы расчета уровня заряда и разряда СНЭ имеют небольшие погрешности относительно данных, полученных экспериментально. Также стоит учитывать, что при увеличении времени моделирования работы СДК отклонение может возрастать, особенно если АКБ уже не новые. Однако при прогнозировании режима работы СДК с дискретностью в час отклонение теоретического значения от экспериментального результата не значительно. Таким образом данная математическая модель может быть использована для повышения точности прогнозирования режима работы и повышения надежности электроснабжения гибридных комплексов, используемых в труднодоступных районах.

Благодарность

Исследование проводилось в рамках проекта «Системы управления солнечно-дизельными комплексами» при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWF-2022-0006.

Литература

1. Андреева, К. А. Оценка влияния параметров системы накопления энергии на эффективность работы солнечно-дизельных комплексов с генерацией на основе возобновляемых источников энергии / К. А. Андреева, А. Г. Васьков // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2023. – № 6(81). – С. 82-91. – EDN JVZRLR.
2. Xiong R. et al. Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 1832–1843.
3. Chiasson J., Vairamohan B. Estimating the state of charge of a battery // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2005. Vol. 13, № 3. P. 465–470.
4. Anbuky H., Pascoe P. E. VRLA battery state-of-charge estimation in telecommunication power systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000. № 47. P. 565–573.
5. Sato S., Kawamura A. A new estimation method of state of charge using terminal voltage and internal resistance for lead acid battery // *Proc. Power Convers. Conf.-Osaka 2002 Cat No02TH8579*. Osaka, Japan: IEEE, 2002. Vol. 2. P. 565–570.
6. Rodrigues S., Munichandraiah N., Shukla A.K. A review of state-of-charge indication of batteries by means of A.C. impedance measurements // *Journal of Power Sources*. 2000. № 87. P. 12–20.
7. Huet F. A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries // *Journal of Power Sources*. 1998. № 70. P. 56–69.
8. How D.N.T. et al. State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Model-Based and Data-Driven Methods: A Review // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 136116– 136136.

9. Rosewater D.M. et al. Battery Energy Storage Models for Optimal Control // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 178357–178391.
10. Sindhuja S., Vasanth K. Modified coulomb counting method of SOC estimation for uninterruptible power supply system's battery management system // *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*. 2015. P. 197–203.
11. Linda O., William E. J., Huff M. Intelligent neural network implementation for SOCI development of Li/CFx batteries // *Proceedings of the 2nd International Symposium on Resilient Control Systems (ISRCS '09)*. 2009. P. 57–62.
12. Malkhandi S. Fuzzy logic-based learning system and estimation of state-of-charge of lead-acid battery // *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2006. Vol. 19, № 5. P. 479–485.
13. Xu L., Wang J.P., Chen Q.S. Kalman filtering state of charge estimation for battery management system based on a stochastic fuzzy neural network battery model // *Energy Conversion and Management*. 2012. № 53. P. 33–39.
14. Wang J. et al. Combined state of charge estimator for electric vehicle battery pack // *Control Engineering Practice*. 2007. № 15. P. 1569–1576.
15. Kim J., Cho B.H. State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per-Unit System // *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2011. Vol. 60, № 9. P. 4249–4260.

References

1. Andreeva, K. A. Ocenka vliyaniya parametrov sistemy nakopleniya energii na effektivnost' raboty solnechno-dizel'nyh kompleksov s generaciej na osnove vozobnovlyemyh istochnikov energii / K. A. Andreeva, A. G. Vas'kov // *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. – 2023. – № 6(81). – p. 82-91. – EDN JVZRLR.
2. Xiong R. et al. Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 1832–1843.
3. Chiasson J., Vairamohan B. Estimating the state of charge of a battery // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2005. Vol. 13, № 3. P. 465–470.
4. Anbuky H., Pascoe P. E. VRLA battery state-of-charge estimation in telecommunication power systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000. № 47. P. 565–573.
5. Sato S., Kawamura A. A new estimation method of state of charge using terminal voltage and internal resistance for lead acid battery // *Proc. Power Convers. Conf.-Osaka 2002 Cat No02TH8579*. Osaka, Japan: IEEE, 2002. Vol. 2. P. 565–570.
6. Rodrigues S., Munichandraiah N., Shukla A.K. A review of state-of-charge indication of batteries by means of A.C. impedance measurements // *Journal of Power Sources*. 2000. № 87. P. 12–20.
7. Huet F. A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries // *Journal of Power Sources*. 1998. № 70. P. 56–69.
8. How D.N.T. et al. State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Model-Based and Data-Driven Methods: A Review // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 136116–136136.
9. Rosewater D.M. et al. Battery Energy Storage Models for Optimal Control // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 178357–178391.
10. Sindhuja S., Vasanth K. Modified coulomb counting method of SOC estimation for uninterruptible power supply system's battery management system // *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*. 2015. P. 197–203.

11. Linda O., William E. J., Huff M. Intelligent neural network implementation for SOCI development of Li/CFx batteries // Proceedings of the 2nd International Symposium on Resilient Control Systems (ISRC '09). 2009. P. 57–62.
12. Malkhandi S. Fuzzy logic-based learning system and estimation of state-of-charge of lead-acid battery // Eng. Appl. Artif. Intell. 2006. Vol. 19, № 5. P. 479–485.
13. Xu L., Wang J.P., Chen Q.S. Kalman filtering state of charge estimation for battery management system based on a stochastic fuzzy neural network battery model // Energy Conversion and Management. 2012. № 53. P. 33–39.
14. Wang J. et al. Combined state of charge estimator for electric vehicle battery pack // Control Engineering Practice. 2007. № 15. P. 1569–1576.
15. Kim J., Cho B.H. State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per-Unit System // IEEE Trans. Veh. Technol. 2011. Vol. 60, № 9. P. 4249–4260.

Modeling Charge and Discharge Characteristics of Batteries Based on Field Data

^{1,1} Ksenia Andreeva, ^{1,2} Alexey Vaskov, ^{1,3} Inora Ainulloyeva, ^{1,4} Nikita Romaniuk

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russia

E-mail: ¹AndreevaXA@mpei.ru, ²VaskovAG@mpei.ru,
³AinulloyevaIN@mpei.ru, ⁴RomaniukNS@mpei.ru

Abstract. In the modern world, a large number of hybrid energy complexes are being built in remote and hard-to-reach areas, which include a diesel power plant (DPP) and a power plant based on renewable energy sources (RES), often solar power plants (SPP). However, due to the stochastic nature of SPP generation, an additional energy storage system (ESS) is required for the reliable operation of the hybrid system, and the operating mode of the complex must be predicted. In this paper, a study was conducted to model the charging and discharging characteristics of the ESS using data obtained at the experimental energy complex of the National Research University MPEI, in order to provide a more accurate prediction of the operating mode of the ESS as part of the solar-diesel complex.

Keywords: solar-diesel complex, PV-genset-battery, energy storage system, modeling, mode planning.

Acknowledgements

The research was carried out within the framework of the project "Solar-diesel complex management Systems" with the support of grant No. FSWF-2022-0006 from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

УДК 551.521.31:551.581.1

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-4-85-102

EDN: LDHUOV

Выбор моделей расчёта суммарной солнечной радиации ясного неба в наклонной плоскости в высоких широтах России

Мордынский Александр Витальевич ^[0009-0003-4617-5295]

Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, Москва

E-mail: weldicat@yandex.ru

Аннотация. Решение основных инженерных задач в области солнечной энергетики требует достоверной информации о суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность. В подавляющем большинстве случаев, доступна только информация по суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность. Расчет радиации на наклонную поверхность проводится путем последовательного применения двух связанных математических моделей, т.н. горизонтальной (декомпозиционной) и наклонной (диффузной). В работе на основе измерений в двух плоскостях (горизонтальной и южно-ориентированной, наклонной под углом 45°), в условиях Москвы, в течение 8-летнего периода (с 01.03.2016г. по 29.02.2024г.), экспериментально верифицированы и определены отклонения при пересчете радиации ясного неба с использованием наиболее распространенных 18 горизонтальных (часовых) и 18 диффузных моделей. Показано, что во всем диапазоне сумм суммарной солнечной радиации часов с ясным небосводом наиболее точными моделями являются DJ (De Jong) и TC (Temps & Coulson). При суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости в диапазоне 800-1000Вт/м² наиболее точные модели OI (Oliveira) и Pe (Perez), а при радиации свыше 1000Вт/м² – модели DTU (Dragsted & Furbo) и Pe (Perez).

Ключевые слова: солнечная радиация, прямая радиация, диффузная радиация, модель ясного неба, суммарная солнечная радиация, суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, суммарная солнечная радиация на наклонную поверхность.

1 Введение

Приемные поверхности генерирующих тепло или электричество солнечных установок, как правило, располагаются не горизонтально, а под некоторым углом к горизонту, который тем больше, чем дальше от экватора эти установки. Для адекватного моделирования их работы необходимы данные о суммах солнечного излучения на наклонной поверхности, которые обычно отсутствуют, и их нужно определять по имеющимся данным для горизонтальной поверхности. Такой пересчет (при отсутствии данных о рассеянной радиации) связан с последовательным использованием декомпозиционных или горизонтальных моделей (г.м.), определяющих долю рассеянного излучения в суммарном в горизонтальной плоскости, и диффузных или наклонных моделей (д.м.), по которым найденные суммы рассеянного излучения пересчитываются с горизонтальной на наклонную плоскость. При этом суммы прямого излучения пересчитываются с помощью геометрических соотношений и интегрирования по времени [1].

К настоящему времени разработано более 300 горизонтальных моделей, 120 из которых, например, представлены в работе [2] и несколько десятков диффузных моделей. На сложность выбора моделей для конкретных климатических условий, наряду с техническими сложностями экспериментов и расчетов, влияет проблема слабой повторяемости известных результатов. Известно очень мало работ, посвященных проблеме выбора комбинации горизонтальных и диффузной моделей, обеспечивающих наиболее точный пересчет сумм солнечного излучения для конкретных климатических условий [3]. Лишь в нескольких расчетных работах выполнены оба этапа пересчета сумм суммарного излучения и приведены результаты измерения компонентов солнечного излучения в горизонтальной плоскости и суммарного излучения в наклонной плоскости. Обзор известных автору работ, а также особенности определения суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости приемников солнечной энергии при малом склонении Солнца в высоких широтах России исследовалось в работе [4]. Показано, что приемлемой для инженерных задач точностью в летнее время обладает связка моделей Tuller [5]+Klucher [6], в зимнее время Skartveit & Olseth [7]+Tian [8].

В условиях высоких географических широт России, которым свойственна большая доля диффузного солнечного излучения в годовом балансе солнечной энергии, невысокая суммарная солнечная радиация и сильное рассеивание прямой солнечной радиации при низком склонении и высоте Солнца над горизонтом большую часть времени энергетические установки работают в ненормальном режиме. Электроника, входящая в состав солнечных установок, имеет выраженную нелинейную эффективность при работе в ненормальном режиме [9]. Важно учитывать особенности эксплуатации установок при слабой освещенности и при ясном небе, когда суммарная солнечная радиация в наклонной плоскости может превышать 1000 Вт/м^2 , а вырабатываемая ФЭП энергия превышает номинальную. Не составляет большого труда определить количество часов малой интенсивности сумм суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости. При этом, используя рекомендованные модели для зимнего времени пересчет не должен вызывать значительных погрешностей [4].

Существует некоторый научный пробел в определении наиболее достоверных комбинаций горизонтальных и диффузных моделей для пересчета сумм суммарного солнечного излучения при чистом небе. Необходима экспериментальная верификация существующих математических моделей в высоких широтах России. Достоверные оценки количества часов (или энергетического вклада в годовом балансе), в которые суммарная солнечная радиация превышает 1000 Вт/м^2 , и вырабатываемая мощность ФЭП может превышать номинальную наряду с нелинейными характеристиками преобразователей энергии, необходимы для качественной оптимизации установленной мощности контроллеров ФЭП и самих ФЭП.

Пересчет $I_{\Sigma}^{\text{ч.гор}}$ в $I_{\Sigma}^{\text{ч.нак}}$. В настоящее время при оценке ресурсов возобновляемых источников энергии и проектировании энергоустановок на ВИЭ широко используются спутниковые и наземные базы данных, различающиеся охватом территории, источниками данных, пространственной сеткой. Среди наиболее широко используемых можно назвать БД NASA POWER [10], WRDC [11], SOLAR GIS [12], ICON [13] и др. БД NASA POWER оперирует массивом длительных рядов спутниковых и наземных измерений за период 01.07.1983 – настоящее время и включает в себя часовые значения температуры воздуха, часовые суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность (г.п.) – $I_{\Sigma}^{\text{ч.гор}}$, суммарную заатмосферную радиацию I_0 , индекс ясности атмосферы K_T , определяемый как $K_T = I_{\Sigma}^{\text{ч.гор}}/I_0$ и др.

Суммарная солнечная радиация на н.п. $I_{\Sigma}^{\text{ч.нак}}$ есть сумма прямой ($I_{\text{пр}}^{\text{ч.нак}}$), рассеянной ($I_{\text{диф}}^{\text{ч.нак}}$) и отраженной ($I_{\text{отр}}^{\text{ч.нак}}$) радиации:

$$I_{\Sigma}^{\text{ч.нак}}(\text{г.м.}, \text{д.м.}, \alpha, K_T, \gamma) = I_{\text{пр}}^{\text{ч.нак}}(I_{\text{пр}}^{\text{сут.гор}}, R_b, \gamma) + I_{\text{диф}}^{\text{ч.нак}}(I_{\text{диф}}^{\text{ч.гор}}, \text{д.м.}, \alpha, K_T, \gamma) + I_{\text{отр}}^{\text{ч.нак}}(\text{д.м.}) \quad (1)$$

На первом этапе расчета по известному значению $I_{\Sigma}^{\text{ч.гор}}$ и рассчитанной [1] или взятой из БД NASA POWER I_0 определяется K_T . Далее с использованием горизонтальной модели (г.м.) можно определить долю диффузной K_d или прямой K_p радиации в $I_{\Sigma}^{\text{ч.гор}}$ по формулам вида: $K_d = I_{\text{диф}}^{\text{ч.гор}}/I_{\Sigma}^{\text{ч.гор}} = F(K_T^{\text{ч}}, \dots)$ и с некоторой погрешностью рассчитать диффузные $I_{\text{диф}}^{\text{ч.гор}}$ и прямые $I_{\text{пр}}^{\text{ч.гор}}$ составляющие суммарной радиации в г.п. Часовые суммы прямой радиации в н.п. $I_{\text{пр}}^{\text{ч.нак}}$ определяют по значению $I_{\text{пр}}^{\text{ч.гор}}$ в г.п. и вычисленному с использованием уравнения Спенсера интегральному коэффициенту отношения прямой радиации в н.п. и г.п. $R_b = I_{\text{пр}}^{\text{ч.нак}}/I_{\text{пр}}^{\text{ч.гор}}$ [1]. Величину диффузной радиации в наклонной плоскости $I_{\text{диф}}^{\text{ч.нак}}$ определяют путем пересчета $I_{\text{диф}}^{\text{ч.гор}}$ с использованием диффузной модели (д.м.).

2 Материалы и методы

В представленном исследовании точность и применимость каждой из рассматриваемых г.м. и д.м. определялась путем сравнения расчетных и экспериментальных сумм суммарной солнечной радиации, приходящей на н.п. $I_{\Sigma}^{\text{ч.нак}}$. Расчетные значения $I_{\Sigma}^{\text{ч.нак}}$ прихода солнечной радиации на н.п. получены последовательным использованием каждого из описанных г.м. и д.м. на основе экспериментально определенной $I_{\Sigma}^{\text{ч.гор}}$. На рисунке 1 представлены результаты синхронных экспериментальных измерений в двух плоскостях, полученных из измерений с частотой 10сек и осредненных по часам $I_{\Sigma}^{\text{ч.нак}}$ и $I_{\Sigma}^{\text{ч.гор}}$. Средняя $I_{\Sigma}^{\text{ч.гор}} = 205 \text{ Вт/м}^2$,

$I_{\Sigma}^{ч.нак}=235 \text{ Вт/м}^2$ за весь период наблюдений (Москва, 01.03.2016-29.02.2024гг.). В экспериментах использовались два пиранометра Kipp & Zonen CM3 (г.п.) и SMP3 (н.п.), расположенных на площадке ОИВТ РАН. По результатам поверки с эталонным пиранометром Kipp & Zonen SMP21 относительное отклонение для модели Kipp & Zonen CM3 составило (-2%...+2%), модели Kipp & Zonen SMP3 – -5%...+5% во всем диапазоне $I_{\Sigma}^{ч.гор}$ и $I_{\Sigma}^{ч.нак}$, далее обозначаемые как GHI (global horizontal irradiance) и GTI (global tilted irradiance), с соответствующими дополнительными индексами. Для часовых сумм отклонение моделей CM3 и SMP3 между собой – не более 2,7%. Модель отраженной радиации в наклонной плоскости получена на основе данных из работы [14] подбором приведенного Альбеда для территории стенда ОИВТ РАН.

Математические модели. Горизонтальные (декомпозиционные) модели (с часовым шагом интегрирования). Рассмотрим 18 г.м. и введем соответствующие им сокращенные обозначения: модели – Re1 (Reindl) [15] получена для США и Европы, Or (Orgill) [16] для Канады, Er (Erbs) [17, 18] для США, Bo_Gl (Boland) [19] для Австралии (Виктория), Bo_En (Boland) [20] для Англии (Bracknell), Bo_Mu (Boland) [21] мульти-региональная зависимость на основе данных для 7 локаций в Австралии (Adelaide, Darwin), Африке (Maputo), Европе (Bracknell, Lisbon, Uccle) и Азии (Macau), DTU [22] для Дании, Ho (Holland) [23] для Торонто, Канада, Ja (Jacovides) [24] для Кипра (для всего года), Ka (Karatasou) [25] для Греции, Ha (Hawladar) [26] для Сингапура, Mu (Muneer) [27] для Индии, Ol (Oliveira) [28] и SOA (Soares) [29] для Бразилии, C1 (De Miguel CLIMED 1) [30] для Европы имеют вид: $K_d=F(K_T^n)$. SO (Skartveit & Olseth) [7] для Норвегии, DJ (De Jong) [31] – для Нидерландов имеют вид: $K_d=F(K_T^n, \gamma)$. BRL (Boland-Ridley-Lauret) усовершенствованная мульти-региональная модель Bo_Mu [21,32], имеют вид: $K_d=F(K_T^n \text{ и } K_T^{сут}, \gamma, T, \phi, AST, \Psi)$, включающая AST-солнечное время в градусах, γ – высота солнца в градусах, K_T^n и $K_T^{сут}$, Ψ -функция K_T^n , определяемая как средний между K_T^n предыдущего и последующего часа, в часы рассвета и заката только последующий за K_T^n часа рассвета (предыдущий закату K_T^n).

Рассмотрим 18 д.м. и введем соответствующие им сокращенные обозначения: в наклонных моделях LJ (Liu & Jordan) [33], Ba (Badescu) [34], Ko (Koronakis) [35] рассеянное излучение считается изотропным, и его доля в часовой сумме солнечного излучения на приемной поверхности – пропорциональной $\cos(\beta)$, в Ti (Tian) [8] – пропорциональной $(1 - \beta)$. В анизотропных моделях распространение рассеянного излучения считается, соответственно, анизотропным, что учитывается добавлением к изотропной модели коэффициентов или слагаемых, описывающих излучение в тех или иных частях небосвода. В TC (Temps & Coulson) [36] часовая сумма рассеянного излучения в наклонной плоскости описывается с помощью двух сомножителей, отвечающих за эффект околосолнечного излучения и просветления небосвода у горизонта. Модель Kl (Klucher) [6] представляет собой развитие модели TC с добавлением модулирующего коэффициента степени покрытия небосвода облачностью. В модели HD (Hay & Davies) [37] учитывается околосолнечное излучение, излучение от остального небосвода считается изотропным. Развитием моделей HD и Kl является модель HDKR [38], в которую

добавлен множитель, увеличивающий сумму прямого излучения в наклонной плоскости за счет околосолнечного.

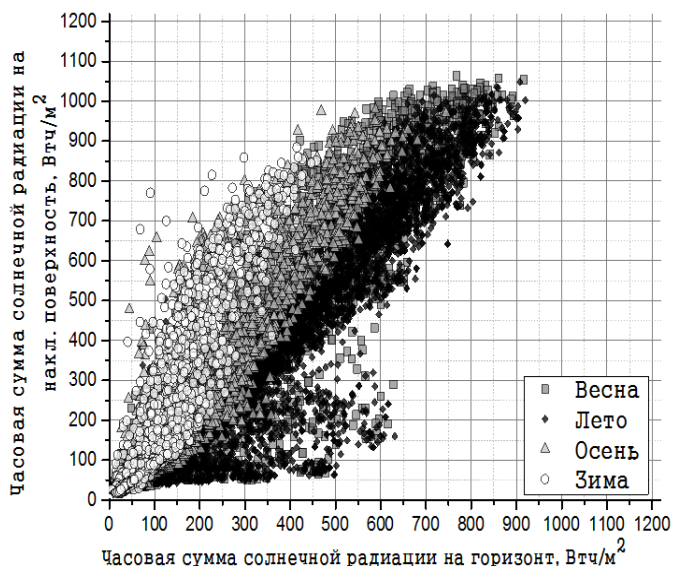


Рис.1. Экспериментальная зависимость $I_{\Sigma^{ч.накл}}$ ($I_{\Sigma^{ч.гор}}$) (Москва, 01.03.2016г.-29.02.2024г.).

В модели Bu (Bugler) [39] часовая сумма рассеянного излучения в наклонной плоскости не считается пропорциональной сумме излучения в горизонтальной плоскости, а рассчитывается через сумму прямого излучения в наклонной плоскости. Модель MI (Ma & Iqbal) [40] определяет часовую сумму излучения в наклонной плоскости через индекс ясности и коэффициент пересчета для прямого излучения. В модели Mu (Muneer) [41] часовая сумма излучения различна для облачных и ясных дней и зависит от константы для конкретных климатических условий. В модели Gu (Gueymard) [42] часовая сумма рассеянного излучения на наклонной плоскости рассчитывается через γ . Модель SO (Skartveit & Olseth) [43] разработана на основе HD с добавлением еще двух слагаемых и учетом затенения горизонта. Модель Pe (Perez) [44] описывает часовую сумму рассеянного излучения как изотропная модель, модифицированная множителем и двумя слагаемыми, отвечающими за «облученность» (часовая сумма прямого излучения на наклонной плоскости) и «освещенность» (часовая сумма рассеянного излучения на горизонтальной поверхности) в зависимости от γ , AM и табличных функций яркости солнечного диска и горизонта. Модель Wi (Wilmott) [45] описывает часовую сумму рассеянного излучения через сумму заатмосферного солнечного излучения, сумму прямого излучения на нормальной к лучу поверхности, коэффициент пересчета для прямого излучения и функцию от γ . Модель SU (Steven and Unsworth) [46, 47] представляет собой сильно модифицированную изотропную модель LJ, включающую поправки на яркость атмосферы в зависимости от облачности и Альбедо, поправку для слагаемого прямой радиации в за-

висимости от зенитного угла и коэффициент отношения зенитных и горизонтальных яркостей. Модель DM (Diez-Mediavilla) [48] является упрощенной модификацией модели Steven and Unsworth, без зависимости от зенитного угла. Модель AE (ASHRAE) [49] определяет диффузную радиацию через радиационный коэффициент $R_{dT} \text{ Gu}$, прямую радиацию, климатические параметры и регрессионную зависимость относительно номера дня года.

3 Результаты и обсуждение

Оценка применимости г.м. и д.м. для пересчета сумм суммарной солнечной радиации ясного неба в условиях Москвы проводилась по относительному отклонению $MBE[\%]$ и среднеквадратичной ошибке $RMSE[\%]$, которые определяются как:

$$MBE[\%] = \frac{1}{N \cdot \overline{Q_{\alpha}^{\text{эксп}}}} \sum_{i=1}^N (Q_{\alpha}^{\text{расч}} - Q_{\alpha}^{\text{эксп}});$$

$$RMSE[\%] = \frac{1}{\overline{Q_{\alpha}^{\text{эксп}}}} \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{\alpha}^{\text{расч}} - Q_{\alpha}^{\text{эксп}})^2}; \quad \overline{Q_{\alpha}^{\text{эксп}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{\alpha}^{\text{эксп}})$$

Где: N -количество экспериментальных точек, $\overline{Q_{\alpha}^{\text{эксп}}}$ – среднее экспериментальное значение суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости, $Q_{\alpha}^{\text{расч}}$ - расчетное значение суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости, $Q_{\alpha}^{\text{эксп}}$ - экспериментальное значение суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости.

Анализировались отклонения $MBE_{20\%}[\%]$ и $RMSE_{20\%}[\%]$ сумм суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости $G_{T_{20\%}}$ рассчитанных из экспериментальных значений для 20% наиболее интенсивных точек в г.п. $G_{HI_{20\%}}$ (среднее значение $G_{HI_{20\%}}=406 \text{ Вт/м}^2$, $G_{T_{20\%}}=519 \text{ Вт/м}^2$), характеризующих ясное небо. Также исследовались отклонения результатов пересчета часов, экспериментальная радиация которых в наклонной плоскости G_{TI} лежала в диапазоне 800-1000 Вт/м^2 ($MBE_{800-1000}[\%]$ и $RMSE_{800-1000}[\%]$, среднее значение $G_{HI_{800-1000}}=828 \text{ Вт/м}^2$, $G_{TI_{800-1000}}=881 \text{ Вт/м}^2$) и превышала 1000 Вт/м^2 ($MBE_{>1000}[\%]$ и $RMSE_{>1000}[\%]$, среднее значение $G_{HI_{>1000}}=\text{нет}$, $G_{TI_{>1000}}=1015 \text{ Вт/м}^2$).

На рисунке 2 представлена зависимость $G_{HI_{20\%}}$, и соответствующие им экспериментальные значения сумм суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости $G_{T_{20\%}}$ в зависимости от высоты Солнца над горизонтом. Выделены области $G_{HI_{20\%}}$ до 800 Вт/м^2 , в диапазоне 800-1000 Вт/м^2 и свыше 1000 Вт/м^2 , которые пересчитывались в отдельных расчетах по всему перечню комбинаций г.м. и д.м..

На рисунке 3 представлена зависимость экспериментальных и рассчитанных по комбинациям моделей DJ+HDKR, SO+Pe, DTU+Pe значений сумм суммарной солнечной радиации за весь экспериментальный многолетний период в наклонной плоскости $G_{T_{20\%}}$, $G_{T_{800-1000}}$, $G_{T_{>1000}}$.

Результаты отклонения $MBE_{20\%}$ [%] и $RMSE_{20\%}$ [%] представлены в таблицах 1 и 2, $MBE_{800-1000}$ [%] и $RMSE_{800-1000}$ [%], в таблицах 3 и 4, $MBE_{>1000}$ [%] и $RMSE_{>1000}$ [%] в таблицах 5 и 6.

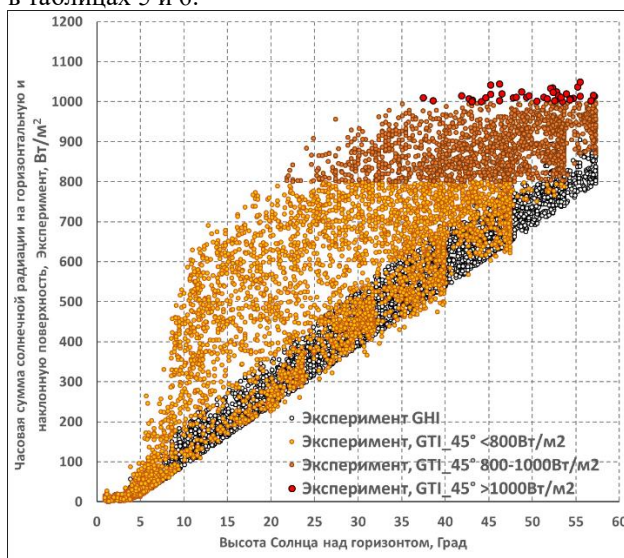


Рис.2. Экспериментальные зависимости часовых сумм суммарной солнечной радиации в горизонтальной $GHI_{20\%}$ и наклонной $GTI_{20\%}$ плоскости в зависимости от высоты Солнца над горизонтом

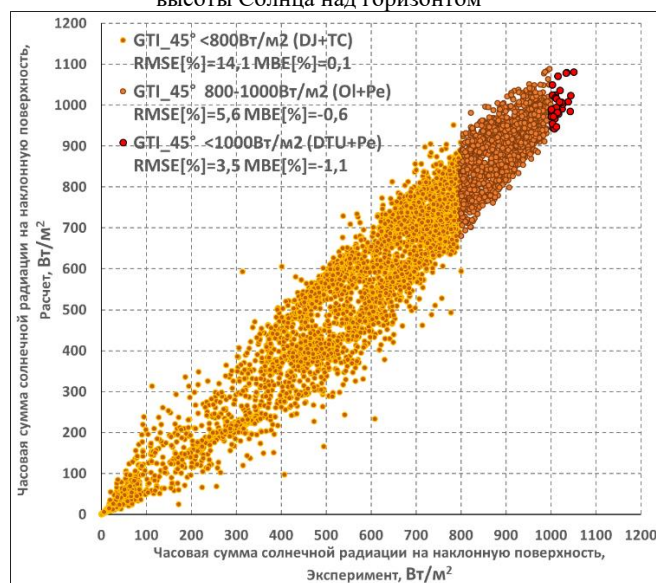


Рис.3. Сравнение экспериментальных и рассчитанных по комбинациям моделей **DJ+TC**, **OI+Pe**, **DTU+Pe** значений сумм суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости $GTI_{20\%}$, $GTI_{800-1000}$, $GTI_{>1000}$

В таблицах 1-6 каждый столбик обозначен сокращённым наименованием соответствующей г.м., каждая строка- сокращенным наименованием д.м.. Табличное значение в выбранном поле г.м. и д.м. получено путем последовательного расчета с использованием этих двух моделей, и определяется по формуле для $MBE[\%]/RMSE[\%]$. Табличные значения отклонений $MBE_{20\%}[\%]$ и $RMSE_{20\%}[\%]$, $MBE_{800-1000}[\%]$ и $RMSE_{800-1000}[\%]$, $MBE_{>1000}[\%]$ и $RMSE_{>1000}[\%]$ следует интерпретировать как полученные при последовательном использовании в расчете соответственной г.м. и д.м. на массивах данных для 20% наиболее интенсивных точек в г.п. $GHI_{20\%}$ ($GPI_{20\%}$), точек $GPI_{800-1000}$ с радиацией в наклонной плоскости в диапазоне 800-1000 Вт/м² и точек $GPI_{>1000}$, у которых радиация выше 1000 Вт/м². Для удобства восприятия добавлена цветовая индикация характера отклонения, в таблицах 1,3,5 синем цветом обозначаются случаи, когда комбинации г.м. и д.м. занижают результаты расчета, а красным-когда завышают. В таблицах 2, 4, 6 цветовая индикация от зеленого цвета, характеризующего наиболее точные комбинации г.м. и д.м. с минимальным $RMSE[\%]$ до красного (для наименее точных комбинаций г.м. и д.м. с максимальным $RMSE[\%]$).

В табл. 1 и табл. 2 представлены результаты расчетов $MBE_{20\%}[\%]$ и $RMSE_{20\%}[\%]$ при экспериментальной верификации моделей по данным $GHI_{20\%}$.

Таблица 1. Относительное отклонение $MBE_{20\%}[\%]$

%	Bo_EN	DJ	BLR	SO	Bo_Mu	DTU	Orb	Ho	Bo_au	Cl1	Ori	Re1	Mu	Ja	OI	Ka	Ha	So
Ti	-15,4	-11,1	-10,7	-8,4	-10,1	-9,4	-8,5	-8,8	-9,5	-8,7	-8,8	-8,9	-10,3	-8,4	-7,1	-8,5	-8,4	-5,7
Ba	-15,2	-10,9	-10,5	-8,3	-9,9	-9,3	-8,4	-8,6	-9,4	-8,5	-8,6	-8,7	-10,1	-8,2	-6,9	-8,4	-8,3	-5,6
Lj	-11,6	-8,2	-7,8	-5,8	-7,3	-6,8	-6,1	-6,3	-6,9	-6,2	-6,2	-6,3	-7,4	-5,8	-4,8	-5,9	-5,8	-3,7
Wi	-6,9	-3,4	-3,3	-1,2	-2,8	-2,3	-1,7	-1,9	-2,3	-1,7	-1,8	-1,8	-2,5	-1,2	-0,4	-1,2	-1,2	0,6
Gu	-9,4	-5,9	-5,6	-3,5	-5,1	-4,6	-3,9	-4,1	-4,7	-4,0	-4,1	-4,1	-5,0	-3,6	-2,7	-3,6	-3,6	-1,6
Bu	-8,8	-4,9	-4,4	-2,2	-3,9	-3,3	-2,4	-2,7	-3,4	-2,6	-2,6	-2,7	-4,0	-2,2	-1,0	-2,4	-2,3	0,3
Ko	-10,0	-7,0	-6,5	-4,6	-6,2	-5,6	-5,0	-5,2	-5,7	-5,1	-5,2	-5,2	-6,1	-4,7	-3,8	-4,8	-4,7	-2,8
SO	-5,7	-2,6	-2,4	-0,4	-2,0	-1,6	-1,1	-1,2	-1,6	-1,0	-1,1	-1,1	-1,7	-0,5	0,2	-0,5	-0,5	1,1
HD	-5,6	-2,6	-2,4	-0,4	-2,0	-1,5	-1,0	-1,2	-1,6	-1,0	-1,1	-1,1	-1,7	-0,5	0,2	-0,5	-0,5	1,1
HDKR	-4,9	-2,1	-1,9	0,1	-1,5	-1,1	-0,6	-0,7	-1,1	-0,6	-0,7	-0,6	-1,1	0,0	0,6	0,0	0,0	1,4
DM	-3,8	-0,9	-0,8	1,4	-0,3	0,0	0,6	0,5	0,1	0,6	0,5	0,5	0,1	1,2	1,8	1,2	1,2	2,5
Mu	-4,1	-1,6	-1,3	0,5	-1,0	-0,6	-0,2	-0,3	-0,6	-0,2	-0,2	-0,2	-0,6	0,4	0,9	0,4	0,4	1,7
KI	-3,5	-1,3	-1,1	0,8	-0,7	-0,3	0,0	-0,1	-0,4	0,0	0,0	0,0	-0,3	0,6	1,0	0,6	0,6	1,7
Pe	-0,4	2,3	2,4	4,4	2,8	3,1	3,6	3,5	3,2	3,7	3,5	3,6	3,2	4,4	5,0	4,5	4,4	5,5
AE	-4,6	-3,4	-3,0	-1,1	-2,8	-2,5	-2,2	-2,2	-2,5	-2,1	-2,2	-2,1	-2,3	-1,6	-1,1	-1,5	-1,6	-0,4
MI	1,3	2,2	2,3	3,2	2,4	2,7	2,8	2,7	2,6	2,8	2,8	2,8	2,7	3,1	3,3	3,1	3,1	3,7
TC	-0,8	0,1	0,5	1,8	0,6	0,9	1,0	1,0	0,8	1,1	1,0	1,1	1,0	1,4	1,7	1,5	1,5	2,2
SU	2,0	2,7	3,0	3,9	3,1	3,3	3,4	3,4	3,2	3,4	3,4	3,4	3,3	3,7	3,9	3,7	3,7	4,3

Таблица 2 Среднеквадратичная ошибка RMSE_{20%} [%]

%	Bo_EN	DJ	BLR	SO	Bo_Mu	DTU	Orb	Ho	Bo_au	Cl1	Ori	Re1	Mu	Ja	Ol	Ka	Ha	So
Ti	24,0	19,4	20,4	18,4	19,3	19,1	18,0	18,2	18,8	18,1	18,2	18,2	19,2	17,6	16,7	17,9	17,9	15,9
Ba	23,8	19,2	20,3	18,3	19,2	19,0	17,9	18,1	18,7	18,0	18,1	18,1	19,1	17,5	16,6	17,8	17,8	15,9
Lj	21,3	17,6	18,5	16,9	17,7	17,5	16,7	16,9	17,3	16,7	16,9	16,8	17,5	16,3	15,6	16,4	16,5	15,1
Wi	17,3	14,6	16,1	15,3	15,4	15,4	15,1	15,1	15,2	15,0	15,1	15,0	15,0	14,7	14,7	14,7	14,8	14,7
Gu	20,0	16,7	17,6	16,0	16,9	16,7	16,1	16,2	16,5	16,0	16,1	16,1	16,4	15,5	15,0	15,6	15,7	14,7
Bu	19,6	16,1	17,4	15,8	16,5	16,5	15,8	15,9	16,2	15,7	15,9	15,8	16,0	15,2	14,9	15,3	15,4	14,7
Ko	20,3	17,0	17,8	16,4	17,2	17,0	16,3	16,4	16,8	16,3	16,4	16,3	16,8	15,8	15,3	16,0	16,0	14,9
SO	16,7	14,4	15,7	15,2	15,2	15,2	15,0	15,0	15,0	14,9	14,9	14,8	14,8	14,6	14,6	14,6	14,7	14,7
HD	16,7	14,4	15,7	15,2	15,2	15,2	15,0	15,0	15,0	14,9	14,9	14,8	14,8	14,6	14,6	14,6	14,7	14,7
HDKR	16,5	14,2	15,5	15,1	15,1	15,1	14,9	14,9	15,0	14,8	14,9	14,8	14,7	14,6	14,6	14,6	14,6	14,7
DM	18,6	16,2	16,9	15,8	16,5	16,4	16,0	16,1	16,3	15,9	16,0	15,9	16,0	15,5	15,2	15,5	15,6	15,1
Mu	16,1	14,1	15,3	15,1	15,0	15,0	14,8	14,8	14,9	14,7	14,8	14,7	14,6	14,5	14,6	14,5	14,6	14,7
KI	16,3	14,5	15,3	14,7	15,0	15,0	14,8	14,8	14,8	14,6	14,7	14,6	14,5	14,3	14,3	14,3	14,4	14,3
Pe	15,5	14,8	15,6	16,0	15,4	15,5	15,5	15,5	15,4	15,4	15,4	15,4	15,3	15,5	15,7	15,6	15,6	15,9
AE	16,9	15,3	16,0	15,1	15,6	15,6	15,3	15,3	15,4	15,2	15,3	15,1	15,1	14,8	14,7	14,8	14,9	14,6
MI	14,7	14,6	15,0	15,6	15,0	15,1	15,1	15,1	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,2	15,3	15,3	15,2	15,5
TC	15,1	14,1	14,5	14,6	14,5	14,6	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,3	14,3	14,2	14,2	14,2	14,3	14,3
SU	14,7	14,4	14,8	15,5	14,9	15,0	14,9	15,0	14,9	15,0	15,0	15,0	15,0	15,1	15,2	15,1	15,1	15,4

В табл. 3 и табл. 4 представлены результаты расчетов $MBE_{800-1000}$ [%] и $RMSE_{800-1000}$ [%] при экспериментальной верификации моделей в диапазоне $GTI_{800-1000}=800-1000$ Вт/м².

Таблица 3. Относительное отклонение $MBE_{800-1000}$ [%]

%	Bo_EN	DJ	BLR	SO	Bo_Mu	DTU	Orb	Ho	Bo_au	Cl1	Ori	Re1	Mu	Ja	Ol	Ka	Ha	So
Ti	-15,7	-11,1	-11,1	-10,9	-10,3	-9,6	-8,9	-9,2	-9,9	-9,3	-9,3	-9,6	-11,7	-9,8	-8,5	-10,2	-9,9	-7,5
Ba	-15,5	-11,0	-11,0	-10,7	-10,1	-9,5	-8,8	-9,1	-9,8	-9,2	-9,1	-9,4	-11,5	-9,7	-8,4	-10,1	-9,8	-7,4
Lj	-12,3	-8,7	-8,6	-8,4	-8,0	-7,4	-6,9	-7,1	-7,7	-7,2	-7,2	-7,4	-9,1	-7,6	-6,6	-7,9	-7,7	-5,8
Wi	-7,5	-4,2	-4,4	-4,1	-3,8	-3,4	-2,9	-3,1	-3,6	-3,2	-3,2	-3,4	-4,6	-3,4	-2,7	-3,7	-3,5	-2,1
Gu	-9,8	-6,3	-6,3	-6,1	-5,7	-5,3	-4,7	-4,9	-5,5	-5,0	-5,0	-5,2	-6,7	-5,3	-4,5	-5,6	-5,4	-3,7
Bu	-9,4	-5,2	-5,1	-4,9	-4,4	-3,8	-3,1	-3,4	-4,1	-3,5	-3,5	-3,7	-5,7	-3,9	-2,8	-4,3	-4,1	-1,8
Ko	-10,8	-7,7	-7,6	-7,4	-7,0	-6,5	-6,0	-6,2	-6,8	-6,3	-6,3	-6,5	-8,0	-6,7	-5,8	-7,0	-6,8	-5,1
SO	-6,5	-3,6	-3,7	-3,5	-3,2	-2,9	-2,5	-2,6	-3,0	-2,7	-2,7	-2,8	-3,9	-2,9	-2,2	-3,1	-3,0	-1,8
HD	-6,5	-3,6	-3,7	-3,5	-3,2	-2,9	-2,5	-2,6	-3,0	-2,7	-2,7	-2,8	-3,9	-2,9	-2,2	-3,1	-3,0	-1,8
HDKR	-5,9	-3,2	-3,3	-3,1	-2,8	-2,5	-2,1	-2,3	-2,6	-2,3	-2,3	-2,5	-3,5	-2,5	-1,9	-2,7	-2,6	-1,5
DM	-4,1	-1,3	-1,4	-1,1	-0,9	-0,7	-0,2	-0,4	-0,7	-0,4	-0,4	-0,6	-1,5	-0,5	0,0	-0,7	-0,6	0,4
Mu	-5,2	-2,9	-2,9	-2,7	-2,5	-2,2	-1,9	-2,0	-2,3	-2,0	-2,1	-2,2	-3,1	-2,2	-1,7	-2,4	-2,3	-1,3
KI	-4,6	-2,5	-2,6	-2,4	-2,2	-1,9	-1,7	-1,8	-2,1	-1,8	-1,8	-1,9	-2,7	-1,9	-1,5	-2,1	-2,0	-1,2
Pe	-2,5	0,2	0,0	0,4	0,5	0,7	1,0	0,9	0,6	0,9	0,8	0,7	-0,1	0,9	1,5	0,7	0,8	1,4
AE	-0,3	-0,3	-0,1	0,0	-0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,0
MI	-2,1	-1,3	-1,3	-1,2	-1,2	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,4	-1,0	-0,8	-1,1	-1,1	-0,6
TC	-3,3	-2,2	-2,1	-2,1	-1,9	-1,6	-1,6	-1,7	-1,9	-1,7	-1,7	-1,8	-2,3	-1,8	-1,5	-1,9	-1,9	-1,2
SU	-1,4	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,5	-0,5	-0,6	-0,9	-0,6	-0,4	-0,7	-0,6	-0,3

Таблица 4. Среднеквадратичная ошибка $RMSE_{800-1000}$ [%]

%	Bo_EN	DJ	BLR	SO	Bo_Mu	DTU	Orb	Ho	Bo_au	Cl1	Ori	Re1	Mu	Ja	Ol	Ka	Ha	So
Ti	17,1	12,7	13,2	12,6	12,3	12,3	10,9	11,2	12,0	11,3	11,4	11,7	13,3	11,5	10,4	11,9	11,7	9,5
Ba	16,9	12,6	13,1	12,5	12,2	12,2	10,8	11,1	11,8	11,2	11,2	11,5	13,2	11,4	10,3	11,8	11,6	9,4
Lj	14,0	10,6	11,0	10,5	10,3	10,5	9,2	9,5	10,1	9,5	9,6	9,8	11,0	9,7	8,9	10,0	9,8	8,2
Wi	10,1	7,5	8,1	7,6	7,5	7,7	6,9	7,1	7,4	7,1	7,1	7,2	7,8	7,0	6,6	7,2	7,1	6,3
Gu	12,1	8,9	9,4	8,8	8,7	8,9	7,8	8,0	8,5	8,0	8,1	8,3	9,2	8,1	7,4	8,3	8,2	6,9
Bu	11,7	8,3	9,0	8,3	8,2	8,7	7,3	7,5	8,0	7,5	7,6	7,8	8,7	7,5	6,8	7,7	7,6	6,4
Ko	12,7	9,8	10,1	9,6	9,5	9,7	8,6	8,8	9,3	8,8	8,9	9,1	10,1	9,0	8,2	9,2	9,1	7,7
SO	9,3	7,1	7,7	7,2	7,1	7,4	6,6	6,8	7,0	6,8	6,8	6,9	7,3	6,7	6,4	6,8	6,8	6,2
HD	9,3	7,1	7,7	7,2	7,1	7,4	6,6	6,8	7,0	6,8	6,8	6,9	7,3	6,7	6,4	6,8	6,8	6,2
HDKR	8,8	6,8	7,4	6,9	6,9	7,2	6,5	6,6	6,8	6,6	6,6	6,7	7,1	6,5	6,3	6,6	6,6	6,1
DM	8,8	7,0	7,3	6,9	6,9	7,2	6,5	6,6	6,8	6,6	6,7	6,7	7,1	6,6	6,3	6,7	6,7	6,1
Mu	8,3	6,6	7,1	6,7	6,7	7,0	6,4	6,5	6,6	6,4	6,5	6,6	6,8	6,4	6,2	6,5	6,5	6,0
Kl	7,7	6,2	6,6	6,3	6,3	6,6	6,0	6,1	6,2	6,1	6,1	6,2	6,4	6,0	5,8	6,1	6,1	5,7
Pe	6,9	5,8	6,1	5,8	5,8	6,1	5,7	5,7	5,8	5,7	5,8	5,7	5,8	5,7	5,6	5,7	5,7	5,6
AE	7,5	6,6	6,7	6,4	6,5	6,8	6,2	6,3	6,4	6,3	6,3	6,4	6,6	6,3	6,1	6,4	6,4	6,0
MI	6,4	6,0	6,2	6,1	6,1	6,5	6,0	6,0	6,1	6,0	6,1	6,1	6,1	6,0	6,0	6,0	6,0	5,9
TC	6,5	5,9	6,1	6,0	6,0	6,4	5,9	5,9	6,0	5,9	5,9	6,0	6,0	5,9	5,8	5,9	5,9	5,7
SU	6,1	5,7	5,9	5,7	5,8	6,1	5,7	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7

В табл. 5 и табл. 6 представлены результаты расчетов $MBE_{>1000}$ [%] и $RMSE_{>1000}$ [%] при экспериментальной верификации моделей в диапазоне $GTI_{>1000} > 1000$ Вт/м².

Таблица 5. Относительное отклонение $MBE_{>1000}$ [%]

%	Bo_EN	DJ	BLR	SO	Bo_Mu	DTU	Orb	Ho	Bo_au	Cl1	Ori	Re1	Mu	Ja	Ol	Ka	Ha	So
Ti	-13,3	-9,7	-8,6	-9,2	-8,2	-8,4	-7,9	-7,9	-8,1	-8,1	-7,8	-7,7	-10,2	-8,9	-7,9	-9,3	-8,8	-7,5
Ba	-13,2	-9,6	-8,5	-9,1	-8,1	-8,3	-7,8	-7,8	-8,0	-8,0	-7,7	-7,6	-10,1	-8,8	-7,8	-9,2	-8,7	-7,4
Lj	-10,7	-7,8	-6,9	-7,4	-6,6	-6,8	-6,4	-6,4	-6,5	-6,6	-6,3	-6,3	-8,3	-7,2	-6,4	-7,5	-7,2	-6,1
Wi	-5,8	-3,7	-3,2	-3,5	-3,1	-3,3	-2,9	-2,9	-3,0	-3,0	-2,9	-2,9	-4,0	-3,4	-2,9	-3,5	-3,3	-2,8
Gu	-8,3	-5,7	-4,9	-5,4	-4,7	-4,9	-4,5	-4,5	-4,6	-4,6	-4,5	-4,4	-6,0	-5,2	-4,6	-5,4	-5,1	-4,3
Bu	-7,4	-4,0	-3,0	-3,6	-2,7	-2,9	-2,4	-2,4	-2,5	-2,5	-2,3	-2,2	-4,5	-3,3	-2,4	-3,7	-3,3	-2,0
Ko	-9,6	-7,1	-6,2	-6,7	-6,0	-6,1	-5,8	-5,8	-5,9	-5,9	-5,7	-5,7	-7,4	-6,5	-5,8	-6,7	-6,4	-5,5
SO	-5,2	-3,4	-2,9	-3,2	-2,8	-3,0	-2,6	-2,6	-2,7	-2,7	-2,6	-2,6	-3,6	-3,0	-2,6	-3,2	-3,0	-2,5
HD	-5,2	-3,4	-2,9	-3,2	-2,8	-3,0	-2,6	-2,6	-2,7	-2,7	-2,6	-2,6	-3,6	-3,0	-2,6	-3,2	-3,0	-2,5
HDKR	-4,8	-3,1	-2,7	-2,9	-2,6	-2,7	-2,4	-2,4	-2,5	-2,5	-2,4	-2,4	-3,3	-2,8	-2,4	-2,9	-2,8	-2,3
DM	-2,1	-0,6	-0,3	-0,5	-0,3	-0,5	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,8	-0,4	-0,2	-0,5	-0,4	-0,1
Mu	-4,4	-2,9	-2,5	-2,7	-2,4	-2,6	-2,3	-2,3	-2,4	-2,3	-2,3	-2,3	-3,1	-2,6	-2,3	-2,7	-2,6	-2,2
Kl	-4,4	-3,1	-2,8	-3,0	-2,7	-2,8	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,5	-3,3	-2,9	-2,6	-3,0	-2,9	-2,5
Pe	-2,7	-0,6	-0,8	-0,8	-0,9	-1,1	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-0,8	-1,0	-1,1	-0,7	-0,6	-0,8	-0,9	-0,7
AE	-0,6	-1,0	-0,9	-0,9	-0,9	-0,8	-1,0	-1,0	-0,9	-1,0	-1,0	-0,9	-0,8	-0,9	-1,0	-0,9	-1,0	-1,0
MI	-2,5	-2,0	-1,9	-1,9	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-2,1	-1,9	-1,8	-1,9	-1,9	-1,7
TC	-4,1	-3,2	-2,9	-3,1	-2,8	-2,9	-2,8	-2,7	-2,8	-2,8	-2,7	-2,7	-3,4	-3,0	-2,7	-3,1	-3,0	-2,7
SU	-2,2	-1,9	-1,7	-1,8	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,6	-1,9	-1,8	-1,7	-1,8	-1,8	-1,6

Таблица 6. Среднеквадратичная ошибка $RMSE_{>1000}[\%]$

%	Vo_EN	DJ	BLR	SO	Vo_Mu	DTU	Orb	Ho	Vo_au	Cl1	Ori	Re1	Mu	Ja	OI	Ka	Ha	So
Ti	14,2	10,4	9,7	10,2	9,6	9,4	8,9	8,8	9,4	9,0	8,7	8,9	11,1	9,9	8,9	10,1	9,6	8,5
Ba	14,1	10,3	9,7	10,1	9,5	9,3	8,8	8,7	9,4	8,9	8,6	8,8	11,0	9,8	8,8	10,0	9,5	8,4
Lj	11,7	8,7	8,2	8,6	8,1	7,8	7,6	7,5	8,0	7,6	7,4	7,6	9,3	8,3	7,6	8,5	8,1	7,2
Wi	7,6	5,6	5,6	5,7	5,6	5,1	5,3	5,2	5,6	5,3	5,2	5,3	6,1	5,6	5,3	5,6	5,4	5,1
Gu	9,5	6,9	6,5	6,8	6,5	6,1	6,0	6,0	6,4	6,0	5,9	6,1	7,4	6,6	6,1	6,8	6,3	5,8
Bu	8,9	5,6	5,6	5,8	5,7	5,0	4,9	4,7	5,6	4,8	4,6	5,1	6,4	5,5	4,9	5,6	5,0	4,5
Ko	10,6	8,0	7,6	7,9	7,6	7,2	7,1	7,0	7,5	7,1	6,9	7,1	8,5	7,7	7,0	7,8	7,4	6,7
SO	7,1	5,4	5,4	5,5	5,4	4,9	5,1	5,0	5,3	5,1	5,0	5,2	5,8	5,4	5,1	5,4	5,1	5,0
HD	7,1	5,4	5,4	5,5	5,4	4,9	5,1	5,0	5,3	5,1	5,0	5,2	5,8	5,4	5,1	5,4	5,1	5,0
HDKR	6,7	5,2	5,2	5,3	5,2	4,7	5,0	4,9	5,2	5,0	4,9	5,0	5,5	5,2	5,0	5,2	5,0	4,8
DM	5,4	4,4	4,3	4,4	4,3	3,7	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,6	4,4	4,3	4,4	4,3	4,3
Mu	6,4	5,1	5,1	5,2	5,1	4,6	4,9	4,8	5,1	4,9	4,8	4,9	5,4	5,1	4,9	5,1	4,9	4,8
KI	6,3	5,1	5,1	5,2	5,1	4,7	4,9	4,9	5,1	4,9	4,8	5,0	5,4	5,1	4,9	5,1	4,9	4,8
Pe	5,2	3,9	3,9	4,0	3,9	3,5	4,1	4,0	3,9	4,0	4,0	3,8	4,0	3,9	3,9	3,8	3,8	4,0
AE	4,1	4,2	4,1	4,1	4,1	4,5	4,2	4,2	4,1	4,2	4,2	4,1	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2	4,2
MI	5,1	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7	4,7	4,7	4,8	4,7	4,7	4,8	4,9	4,8	4,7	4,8	4,7	4,7
TC	6,0	5,2	5,2	5,3	5,2	4,9	5,0	5,0	5,2	5,0	4,9	5,1	5,4	5,2	5,0	5,2	5,0	4,9
SU	4,7	4,5	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	4,4	4,5	4,4	4,4	4,5	4,5	4,5	4,4	4,5	4,4	4,4

Из таблиц 1-2 видно, что во всем диапазоне сумм суммарной солнечной радиации часов с ясным небосводом наиболее точными моделями являются DJ и TC, отклонения которых составляют $MBE[\%]=0,1 / RMSE[\%] =14,1$. Из таблиц 3-4 видно, что при суммарной солнечной радиации в наклонной плоскости в диапазоне $800-1000 \text{ Вт/м}^2$ наиболее точные модели OI и Pe, отклонения которых $MBE[\%]=-0,6 / RMSE[\%] =5,6$, а при радиации свыше 1000 Вт/м^2 , таблица 5 и 6–модели DTU и Pe, с отклонениями $MBE[\%]=-1,1 / RMSE[\%] =3,5$. Комбинации данных моделей и рекомендованы для использования.

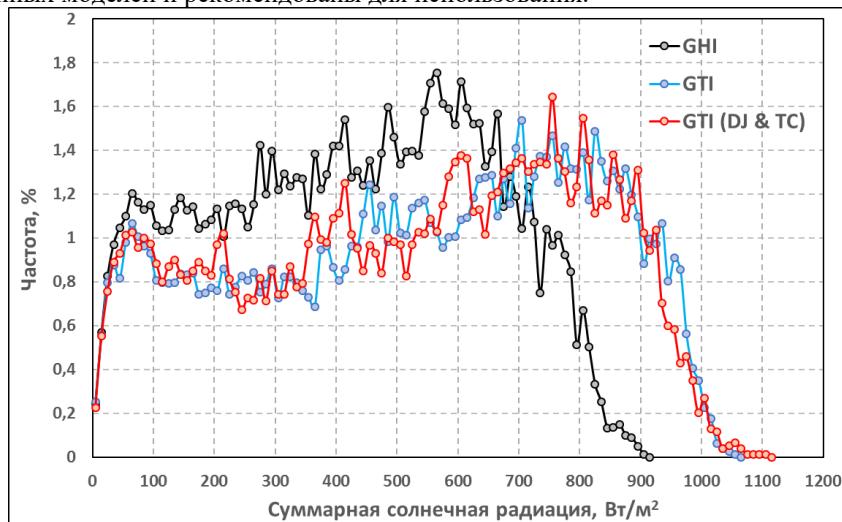


Рис.4. Частотное экспериментальное и расчетное распределение сумм суммарной солнечной радиации в горизонтальной и наклонных плоскостях за 8-летний период (г. Москва)

На рисунке 4 представлено частотное распределение сумм суммарной солнечной радиации в горизонтальной и наклонных плоскостях, а также результаты расчета по моделям DJ и ТС за 8-летний экспериментальный период, наблюдаемый на площадке ОИВТРАН. На диапазон 0-100Вт/м² приходится энергии 10,5% и 9%, на диапазон 800-1000Вт/м² 2,5% и 20,8%, свыше 1000Вт/м² 0 и 0,6% соответственно.

4 Выводы

Экспериментальная верификация наиболее известных моделей пересчета сумм суммарной солнечной радиации из горизонтальной в наклонную плоскость показала, что в высоких широтах России сложно подобрать одну универсальную комбинацию математических моделей для всего диапазона часов с ясным небом, поскольку этим часам соответствует значительный разброс высот Солнца над горизонтом. Наиболее универсальными моделями для использования в ясные часы являются DJ и ТС, наибольшие суммы суммарной солнечной радиации точнее пересчитывают модели OI и Pe (800-1000Вт/м²) и DTU и Pe (свыше 1000Вт/м²). На диапазон свыше 1000Вт/м² приходится менее 1% энергии, что значительно меньше 10% диапазона 0-100Вт/м².

Литература

1. Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, Second ed. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
2. Edgar F.M. Abreu, Paulo Canhoto, Maria João. Costa Prediction of diffuse horizontal irradiance using a new climate zone model. *Renewable and Sustainable energy reviews* 110 (2019) p.28-42, найти 200 шт.
3. Seyed Abbas Mousavi Maleki, H. Hizam, C. Gomes. Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces:Models Re-Visited. *Energies* 2017, 10, 134.
4. A. V. Mordynskiy. Experimental Verification of Models for Conversion of Total Solar Radiation from a Horizontal to Inclined Plane under Climatic Conditions of Moscow. *Applied Solar Energy*, 2021, Vol. 57, No. 5, pp. 430–437.
5. [Tu] S.E. Tuller, “The relationship between diffuse, total and extraterrestrial solar radiation”, *Solar Energy*, vol. 18, p. 259, 1976.
6. [Kl] Klucher T.M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces//*Solar Energy*.23, 1979.-P.111–114.
7. [SO] Skartveit A., Olseth J.A., A model for the diffuse fraction of hourly global radiation//*Solar Energy*. 38 (4), 1987.-P.271–274.
8. [Ti] Tian Y.Q., Davies-Colley R.J., Gong P. Thorrold, B.W. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect//*Agric. For. Meteorol.*109,2001.-P. 67–74.
9. A. V. Mordynskiy, V. B. Mordynskiy, S. V. Kiseleva, and M. Zh. Suleymanov. Experimental Comparison of the Efficiency of Low-Power PWM and MPPT Controllers of a PV/Battery under Moscow’s Climatic Conditions. *Applied Solar Energy*, 2018, Vol. 54, No. 4, pp. 229–234.

10. NASA POWER. Prediction of Worldwide Energy Resources. [Online]. <https://power.larc.nasa.gov/>. [Accessed: Jun. 5, 2021].
11. World Radiation Data Centre. [Online]. http://wrdc.mgo.rssi.ru/wrdc_en_new.htm. [Accessed: Jun. 5, 2021].
12. Solar radiation and PV power forecast. Solargis [Online]. <https://solargis.com/products/forecast/overview>. [Accessed: 14.09.2020].
13. DWD. “Our Services. Open Data. Open Data Server”, DWD. [Online]. <https://opendata.dwd.de/weather/nwp/>. [Accessed: Jun. 5, 2021].
14. Стадник В.В., Горбаренко Е.В., Шиловцева О.А., Задворных В.А. (2016). Сравнение вычисленных и измеренных величин суммарной и рассеянной радиации, поступающей на наклонные поверхности, по данным наблюдений в метеорологической обсерватории МГУ //Труды ГГО. Вып.581. С.138-154.
15. [Re1] Reindl, D.T., Beckman, W.A. and Duffie, J.A., “Diffuse Fraction Correlations”, Solar Energy, Vol. 45, No. 1, (1990), pp.1-7.
16. [Or] Orgill J.R., Hollands K.G.T. Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal surface // Solar Energy. V.19, 1977.-P.357.
17. [Er] Erbs, D. G., “Methods for Estimating the Diffuse Fraction of Hourly, Daily and Monthly Average Global Solar Radiation,” Masters Thesis in Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, (1980).
18. [Er] Erbs, D.G.; Klein, S.A.; Duffie, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. Sol. Energy 1982, 28, 293–302.
19. [Bo_Gl] Boland, J.; Scott, L.; Luther, M. Modelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. Environmetrics 2001, 12, 103–116.
20. [Bo_En] Boland J, Ridley BH, Brown BM. Models of diffuse solar radiation. Ren. Energy 2008;33(4):575–84.
21. [Bo_Mu] Boland J, Ridley B. Models of diffuse solar fraction. Modeling solar radiation at the Earth's surface: recent advances Berlin: Springer; 2008. p. 193–219. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77455-6_8.
22. [DTU] Dragsted, J.; Furbo, S. Solar Radiation and Thermal Performance of Solar Collectors for Denmark; DTU Civil Engineering Reports, No. R-275; Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark: Copenhagen, Denmark, 2012.
23. [Ho] Hollands KGT. A derivation of the diffuse fraction's dependence on the clearness index. Sol Energy 1985;35(2):131–6. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90003-9).
24. [Ja] Jacovides, C.P.; Tymvios, F.S.; Assimakopoulos, V.D.; Kaltsounides, N.A. Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation. Renew. Energy 2006, 31, 2492–2504.
25. [Ka] Karatasou, S.; Santamouris, M.; Geros, V. Analysis of experimental data on diffuse solar radiation in Athens, Greece, for building applications. Int. J. Sustain. Energy 2003,23, 1–11.
26. [Ha] Hawlader, M.N.A. Diffuse, global and extra-terrestrial solar radiation for Singapore. Int. J. Ambient Energy 1984, 5, 31–38.
27. [Mu] T.Muneer, S.Saluja. Correlation between hourly diffuse and global irradiation for the UK. Energy Convers. Manag. 1984, 24, 265–267.
28. [Ol] Oliveira, A.P.; Escobedo, J.F.; Machado, A.J.; Soares, J. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. Appl. Energy 2002, 71, 59–73.
29. [So] Soares, J.; Oliveira, A.P.; Božnar, M.Z.; Mlakar, P.; Escobedo, J.F.; Machado, A.J. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique.

30. [C1] De Miguel, A., Bilbao, J., Aguiar, R., Kambezidis, H.D., Negro, E., 2001. Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean belt area. *Solar Energy* 70, 143–153.
31. [DJ] De Jong J. B. R. M. Een karakterisering van de zonnestraling in Nederland. Doctoraalverslag Vakgroep Fysische Aspecten van de Gebouwde Omgeving afd. Bouwkunde en Vakgroep Warmte-en Stromingstechnieken afd. Werktuigbouwkunde, Technische Hogeschool (Techn. Univ), Eindhoven, Netherlands (1980).
32. [BRL] Ridley B, Boland J, Lauret P. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy* 2010; 35 478–483
33. [LJ] Liu B, Jordan R. Daily insolation on surfaces tilted towards equator. *ASHRAE* 1961, 53–59.
34. [Ba] Badescu V. 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces//*Renew. Energy*. 26, 2002.-P.221–233.
35. [Ko] Koronakis P.S. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area//*Solar Energy*. 36, 1986.-P.217–225.
36. [TC] Temps R.C., Coulson K.L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations//*Solar Energy*. 19, 1977.-P.179–184.
37. [HD] Hay J., Davies J. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces//*Solar Energy*. 23, 1980.-P.301–307.]
38. [HDKR] Reindl D.T. Evaluation of hourly tilted surface radiation models//*Sol.En*. 45, 1990.-P.90.
39. [Bu] Bugler J.W. The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation//*Sol.En*. 19, 1977.-P.477.
40. [MI] Ma C., Iqbal M. Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces//*Solar Energy*. 31, 1983.-P.313–317.]
41. [Mu] Muneer T. *Solar Radiation and Daylight Models*, 2nd edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
42. [Gu] Gueymard C. An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar Energy*. 38 №5, 1987.-P.367–386.
43. [SO] Skartveit A., Olseth J. Modelling slope irradiance at high latitudes//*Sol.En*. 36, 1986.-P.333.
44. [Pe] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44 (5), 271–289.
45. [Wi] Willmott C.J. On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors//*Solar Energy*. 28, 1982.-P.205–216.
46. [SU] Steven M, Unsworth M. The diffuse solar irradiance of slopes under cloudless skies. *Q J R Meteorol Soc* 1979; 105(445):593–602.
47. [SU] Steven M, Unsworth H. The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies. *Q J R Meteorol Soc* 1980; 106(447):57–61.
48. [DM] Díez-Mediavilla M. Medida y modelización de radiación solar difusa sobre plano inclinado [Ph.D. thesis]. Universidad de Valladolid, Valladolid; 2001.
49. [AE] Lokmanhekim M. Procedure for determining heating and cooling loads for computerized energy calculations. *ASHRAE*, New York; 1971.

References

1. Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, Second ed. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
2. Edgar F.M. Abreu, Paulo Canhoto, Maria João. Costa Prediction of diffuse horizontal irradiance using a new climate zone model. *Renewable and Sustainable energy reviews* 110 (2019) p.28-42, найти 200 шт.
3. Seyed Abbas Mousavi Maleki, H. Hizam, C. Gomes. Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces:Models Re-Visited. *Energies* 2017, 10, 134.
4. A. V. Mordynskiy. Experimental Verification of Models for Conversion of Total Solar Radiation from a Horizontal to Inclined Plane under Climatic Conditions of Moscow. *Applied Solar Energy*, 2021, Vol. 57, No. 5, pp. 430–437.
5. [Tu] S.E. Tuller, “The relationship between diffuse, total and extraterrestrial solar radiation”, *Solar Energy*, vol. 18, p. 259, 1976.
6. [KI] Klucher T.M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces//*Solar Energy*.23, 1979.-P.111–114.
7. [SO] Skartveit A., Olseth J.A., A model for the diffuse fraction of hourly global radiation//*Solar Energy*. 38 (4), 1987.-P.271–274.
8. [Ti] Tian Y.Q., Davies-Colley R.J., Gong P. Thorrold, B.W. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect//*Agric. For. Meteorol.*109,2001.-P. 67–74.
9. A. V. Mordynskiy, V. B. Mordynskiy, S. V. Kiseleva, and M. Zh. Suleymanov. Experimental Comparison of the Efficiency of Low-Power PWM and MPPT Controllers of a PV/Battery under Moscow’s Climatic Conditions. *Applied Solar Energy*, 2018, Vol. 54, No. 4, pp. 229–234.
10. NASA POWER. Prediction of Worldwide Energy Resources. [Online]. <https://power.larc.nasa.gov/>. [Accessed: Jun. 5, 2021].
11. World Radiation Data Centre. [Online]. http://wrdc.mgo.rssi.ru/wrdc_en_new.htm. [Accessed: Jun. 5, 2021].
12. Solar radiation and PV power forecast. Solargis [Online]. <https://solargis.com/products/forecast/overview>. [Accessed: 14.09.2020].
13. DWD. “Our Services. Open Data. Open Data Server”, DWD. [Online]. <https://opendata.dwd.de/weather/nwp/>. [Accessed: Jun. 5, 2021].
14. Stadnik V.V., Gorbarenko E.V., Shilovtseva O.A., Zadvornyykh V.A. (2016). Sravnenie vychislennykh i izmerennykh velichin summarnoy i rasseyannoy radiacii postupayushhej na naklonnye poverxnosti po dannym nablyudenij v meterologicheskoy observatorii MGU // *Trudy GGO*. Vol.581. p.138-154.
15. [Re1] Reindl, D.T., Beckman, W.A. and Duffie, J.A., “Diffuse Fraction Correlations”, *Solar Energy*, Vol. 45, No. 1, (1990), pp.1-7.
16. [Or] Orgill J.R., Hollands K.G.T. Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal surface // *Solar Energy*. V.19, 1977.-P.357.
17. [Er] Erbs, D. G., “Methods for Estimating the Diffuse Fraction of Hourly, Daily and Monthly Average Global Solar Radiation,” Masters Thesis in Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, (1980).
18. [Er] Erbs, D.G.; Klein, S.A.; Duffie, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Sol. Energy* 1982, 28, 293–302.
19. [Bo_Gl] Boland, J.; Scott, L.; Luther, M. Modelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. *Environmetrics* 2001, 12, 103–116.

20. [Bo_En] Boland J, Ridley BH, Brown BM. Models of diffuse solar radiation. *Ren. Energy* 2008;33(4):575–84.
21. [Bo_Mu] Boland J, Ridley B. Models of diffuse solar fraction. *Modeling solar radiation at the Earth's surface: recent advances* Berlin: Springer; 2008. p. 193–219. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77455-6_8.
22. [DTU] Dragsted, J.; Furbo, S. *Solar Radiation and Thermal Performance of Solar Collectors for Denmark*; DTU Civil Engineering Reports, No. R-275; Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark: Copenhagen, Denmark, 2012.
23. [Ho] Hollands KGT. A derivation of the diffuse fraction's dependence on the clearness index. *Sol Energy* 1985;35(2):131–6. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90003-9).
24. [Ja] Jacovides, C.P.; Tymvios, F.S.; Assimakopoulos, V.D.; Kaltsounides, N.A. Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation. *Renew. Energy* 2006, 31, 2492–2504.
25. [Ka] Karatasou, S.; Santamouris, M.; Geros, V. Analysis of experimental data on diffuse solar radiation in Athens, Greece, for building applications. *Int. J. Sustain. Energy* 2003,23, 1–11.
26. [Ha] Hawlader, M.N.A. Diffuse, global and extra-terrestrial solar radiation for Singapore. *Int. J. Ambient Energy* 1984, 5, 31–38.
27. [Mu] T.Muneer, S.Saluja. Correlation between hourly diffuse and global irradiation for the UK. *Energy Convers. Manag.* 1984, 24, 265–267.
28. [Ol] Oliveira, A.P.; Escobedo, J.F.; Machado, A.J.; Soares, J. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Appl. Energy* 2002, 71, 59–73.
29. [So] Soares, J.; Oliveira, A.P.; Božnar, M.Z.; Mlakar, P.; Escobedo, J.F.; Machado, A.J. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique.
30. [C1] De Miguel, A., Bilbao, J., Aguiar, R., Kambezidis, H.D., Negro, E., 2001. Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean belt area. *Solar Energy* 70, 143–153.
31. [DJ] De Jong J. B. R. M. Een karakterisering van de zonnestraling in Nederland. Doctoraalverslag Vakgroep Fysische Aspecten van de Gebouwde Omgeving afd. Bouwkunde en Vakgroep Warmte-en Stromingstechnieken afd. Werktuigbouwkunde, Technische Hogeschool (Techn. Univ), Eindhoven, Netherlands (1980).
32. [BRL] Ridley B, Boland J, Lauret P. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy* 2010; 35 478–483
33. [LJ] Liu B.Jordan R.Daily insolation on surfaces tilted towards equator.*ASHRAE*1961,53-59.
34. [Ba] Badescu V. 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces//*Renew. Energy*.26, 2002.-P.221–233.
35. [Ko] Koronakis P.S. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area//*Solar Energy*.36,1986.-P.217–225.
36. [TC] Temps R.C., Coulson K.L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations//*Solar Energy*. 19,1977.-P.179–184.
37. [HD] Hay J., Davies J. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces//*Solar Energy*.23, 1980.-P.301–307.]
38. [HDKR] Reindl D.T. Evaluation of hourly tilted surface radiation models//*Sol.En*.45,1990.-P.90.
39. [Bu] Bugler J.W. The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation//*Sol.En*.19,1977.-P.477.

40. [MI] Ma C., Iqbal M. Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces//Solar Energy. 31, 1983.-P.313–317.].
41. [Mu] Muneer T. Solar Radiation and Daylight Models, 2nd edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
42. [Gu] Gueymard C. An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. Solar Energy. 38 №5,1987.-P.367-386.
43. [SO] Skartveit A.,Olseth J. Modelling slope irradiance at high latitudes//Sol.En.36,1986.-P.333.
44. [Pe] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Solar Energy 44 (5), 271–289.
45. [Wi] Willmott C.J. On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors//Solar Energy.28,1982.-P.205–216.
46. [SU] Steven M, Unsworth M. The diffuse solar irradiance of slopes under cloudless skies. Q J R Meteorol Soc 1979;105(445):593–602.
47. [SU] Steven M, Unsworth H. The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies. Q J R Meteorol Soc 1980;106(447):57–61.
48. [DM] Díez-Mediavilla M. Medida y modelización de radiación solar difusa sobre plano inclinado [Ph.D. thesis]. Universidad de Valladolid, Valladolid; 2001.
49. [AE] Lokmanhekim M. Procedure for determining heating and cooling loads for computerized energy calculations. ASHRAE, New York; 1971.

Selection of Models for Calculating Total Clear Sky Solar Radiation in an Inclined Plane at High Latitudes in Russia

Alexander Mordynskiy

Joint Institute for High Temperatures, Moscow, Russia

E-mail: weldicat@yandex.ru

Abstract. Solving the main engineering problems in the field of solar energy requires reliable information on the total solar radiation on an inclined surface. In the vast majority of cases, only information on the total solar radiation on a horizontal surface is available. Calculation of radiation on an inclined surface is carried out by sequential application of two connected mathematical models, the so-called horizontal (decomposition) and inclined (diffuse). In this work, based on measurements in two planes (horizontal and south-oriented, inclined at an angle of 45 degrees), in Moscow conditions, during an 8-year period (from 01.03.2016 to 29.02.2024), deviations in the recalculation of clear-sky radiation using the most common 18 horizontal (hourly) and 18 diffuse models were experimentally verified and determined. It is shown that in the entire range of

amounts of total solar radiation of clear-sky hours, the most accurate models are DJ & HDKR. With total solar radiation in an inclined plane in the range of 800-1000Wt/m², the most accurate models are SO & Pe, and with radiation over 1000Wt/m², the most accurate models are DTU & Pe.

Keywords: solar radiation, direct radiation, diffuse radiation, clear sky model, GHI, global horizontal irradiance global irradiance on a tilted surface.

УДК 519.2:551.46:551.508.8

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-4-103-114

EDN: LDQARW

Исследование гибридных систем накопления энергии на основе суперконденсаторов

^{1,2} Романюк Никита Сергеевич ^[0009-0000-5769-5091],
^{1,3} Васьков Алексей Геннадьевич ^[0000-0003-4664-8008],
^{1,4} Андреева Ксения Александровна ^[0009-0000-4666-6623],
^{1,5} Васильева Анастасия Алексеевна ^[0009-0001-7922-0801]

¹Научно-исследовательский университет МЭИ, Россия, Москва

E-mail: ¹RomaniukNS@mpei.ru, ²VaskovAG@mpei.ru,

³AndreevaXA@mpei.ru, ⁴VasilyevaAAl@mpei.ru

Аннотация. В статье рассматривается потенциал применения гибридных систем накопления энергии, использующих суперконденсаторы и электрохимические накопители в автономных энергосистемах. Приведено описание разработанного лабораторного стенда для экспериментального исследования гибридной системы накопления энергии, который позволяет проводить испытания эффективности работы системы при статических и импульсных нагрузках. По итогам экспериментов допускается, что использование суперконденсаторов в гибридных системах значительно повышает их эффективность.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, гибридная система накопления энергии, суперконденсаторы

1 Введение

Основной областью использования электростанций на основе ВИЭ является их внедрение в автономные энергосистемы. Они не связаны с ЕЭС и обеспечивают электроснабжение отдельных населенных пунктов и предприятий, расположенных в труднодоступных или удаленных районах. Основными типами электрических станций в автономных энергосистемах являются дизельные электростанции, малые ГЭС, ВЭУ и СЭС. Также используются комбинированные источники в виде автоматизированных гибридных энергокомплексов.

Потребители электроэнергии в подобных энергетических системах нередко характеризуются резкопеременной нагрузкой, например, электрические двигатели и насосы, которые обладают высокими пусковыми токами. Для обеспечения потребностей подобной нагрузки нередко задействуется система накопления энергии (далее СНЭ), которая гарантирует величину тока равная току разряда. Несмотря на краткосрочность данной нагрузки, высокие максимальные значения тока разряда снижают срок эксплуатации электрохимических накопителей [1]. Однако суперконденсаторы способны решить данную проблему. Благодаря своей высокой мощности, они принимают резкопеременную нагрузку на себя.

Электрохимические накопители энергии используют энергию химических реакций для накопления и возврата энергии. Они называются гальваническими элементами или батареями. Это одни из самых распространенных типов электрохимических накопителей. Также они широко используются в энергетике.

Суперконденсатор (так же известный как ионистор) – тип электрического устройства, способные накапливать и отдавать энергию с большой скоростью. Вследствие данной особенности, они нашли применение в автомобильной промышленности, а именно стали альтернативой электрохимическим накопителям. Так как АКБ в основном используется для запуска двигателя от стартера, при котором краткосрочно подается напряжение на стартер, который запускает двигатель, не требуется большая энергоемкость, но необходима большая мощность. Присутствие подобной особенности объясняется устройством суперконденсатора и механизмом запасаения энергии. Суперконденсатор представляет из себя два электрода, погруженных в электролит, и сепаратор. Сепаратор препятствует перемещению заряда между катодом и анодом. Процесс запасаения энергии происходит благодаря электростатическим зарядам, формирующимся на противоположных поверхностях электродов, принадлежащих к двойному электрическому слою. Он появляется между электролитом и электродом. Во время зарядки ионы электролита хаотично перемещаются к поверхности противоположно заряженного электрода. Данный процесс является полностью обратимым. Вследствие этого суперконденсаторы обладают высокой мощностью, длительным сроком эксплуатации, продолжительным хранением и легкостью технического обслуживания.

Суперконденсаторы обладают большей мощностью, чем традиционные электрохимические накопители, а в сравнении с конденсаторами обладают более высокой энергоемкостью, это можно увидеть в таблице 1 [8]. В настоящее время ионные аккумуляторы способны выдавать от 70% до 95% энергии от потраченной на их заряд, в отличии от суперконденсаторов, у которых данный показатель находится в диапазоне от 85% до 99%. Так же аккумуляторы подвержены снижению емкости после нескольких сотен циклов заряда - разряда, а ионисторы способны проработать миллион циклов без значительных изменений в емкости.

Таблица 1. Сравнение характеристик конденсаторов, суперконденсаторов и аккумуляторов

Характеристика	Конденсатор	Суперконденсатор	Аккумулятор
Примеры	Al, Ta оксид	Актив. С в H ₂ SO ₄ , TEABF ₄ /ACN, PC	Pb-Ac, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion
Способ накопления	Электростатический	Электростатический	Электрохимический
E, (Втч/кг)	< 0,1	1 – 10	20 – 200
P, (Вт/кг)	>>10000	500 – 10000	200 – 5000
Время полного разряда	10 ⁻⁶ – 10 ⁻³ с	1 – 60 с	5 мин – 5 часов
Время полного заряда	10 ⁻⁶ – 10 ⁻³ с	1 – 60 с	10 мин – 10 часов
Эффективность разряда	1,0	0,85 – 0,99	0,7 – 0,95
Количество полных циклов, n	>>10 ⁶	>10 ⁶	10 ³ – 5 * 10 ³
Номинальное напряжения U, В	Высокое	2,3 – 2,7	3,2 – 3,7
Сохранность заряда	Низкая	Низкая	Высокая
Кривая заряда	Линейная	Линейная	Плоская
Температурный диапазон	-60 до 125 ^o C	-40 до 65 ^o C	-40 до 60 ^o C – разряд 0 до 45 ^o C – заряд
Стоимость кВтч	>1 000 000\$	>10 000\$	250\$ - 1000\$

Отличие от традиционных аккумуляторов наблюдается и в характере кривых заряда-разряда. У суперконденсаторов она обладает постоянным наклоном, а у аккумуляторов он нелинейный с горизонтальной площадкой. Это можно увидеть на рисунках 1 а) и б).

2 Материалы и методы

Для исследования гибридных систем накопления энергии на основе суперконденсаторов и электрохимических накопителей, был разработан исследовательский стенд. Он должен обеспечить исследование режимов работы гибридной системы накопления при различных видах и значениях нагрузки.

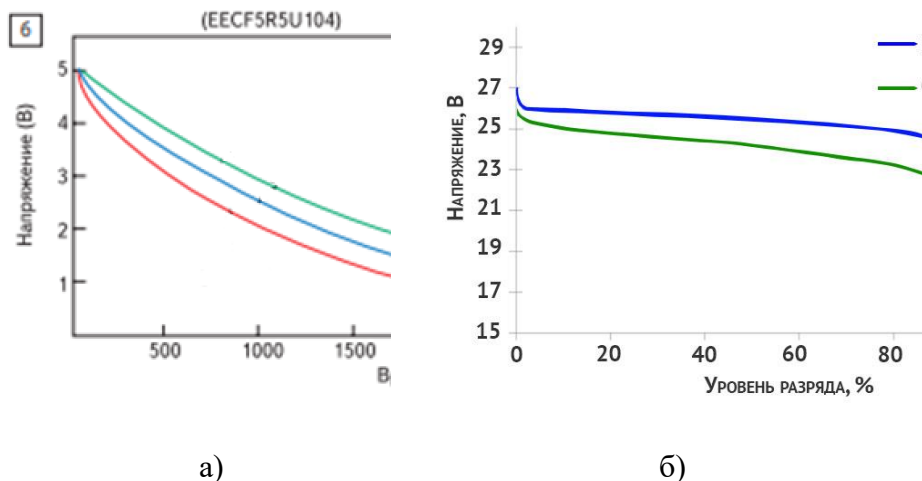


Рис. 1. Кривые разряда: а) суперконденсатора; б) свинцово-кислотного и LiFePO₄ аккумуляторов

В связи с этим подобрано следующее оборудование:

- 1) Бустер суперконденсаторный БСК-83 – предназначен для покрытия импульсной нагрузки, характерной для электрических двигателей. БСК-83 использует в качестве накопителей свинцово-кислотные АКБ с номинальным напряжением 12 В;
- 2) Инвертор Turbosky PI-1000 – предназначен для преобразования постоянного тока 12 В в переменный со значением 220 В;
- 3) Контроллер К-150;
- 4) Насос «Малыш» - в составе оборудования для данного стенда предназначен для имитации импульсной нагрузки, с помощью пусковых токов;
- 5) Лампы «ЭРА» 95 (10 штук) – в составе оборудования для данного стенда предназначены для имитации постоянной нагрузки;
- 6) Токоизмерительный шунт 75ШИП1-200-0.5 75 мВ (2 штуки) – предназначен для измерения тока на стороне системы накопления;
- 7) Токоизмерительный шунт 75ШИП1-10-0.5 75 мВ – предназначен для измерения тока на стороне нагрузки;
- 8) Датчик тока ACS712 30А – предназначен для измерения тока;
- 9) Контроллер Arduino UNO – предназначен для снятия и обработки показаний с датчиков тока В;

На рисунке 2 представлена схема стенда, из которой видно, что он состоит из двух частей: части постоянного тока 12 В и части переменного тока 220 В

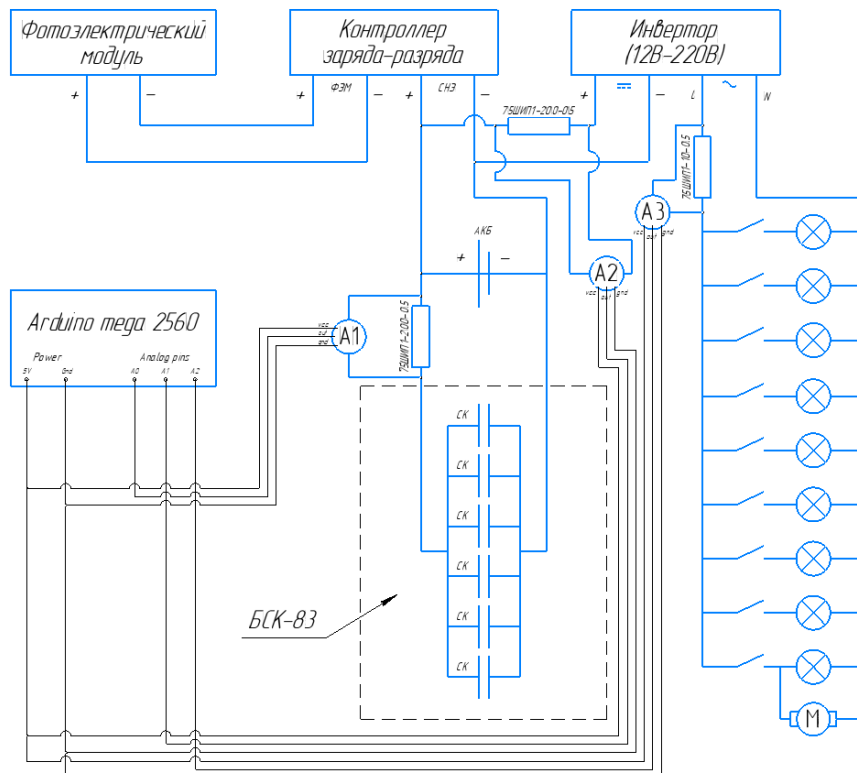


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда

В части переменного тока расположена нагрузка, состоящая из насоса и ламп накаливания. Данная часть имитирует нагрузку, как импульсную (насос), так и статичную (лампы).

В части постоянного тока находится: БСК-83, свинцово-кислотный аккумулятор, инвертор, и контроллер. Система накопления энергии заряжается через контроллер с помощью солнечных модулей или любых других зарядных устройств постоянного тока 12 В.

Измерения токов на данном стенде производятся за счет датчиков тока ACS712 30А, установленных параллельно токоизмерительному шунту или двум шунтам, что позволяет измерять большие токи за счет параллельности подключения.

Данный стенд способен имитировать 4 режима работы:

- Заряд гибридной системы накопления энергии
- Разряд электрохимического накопителя энергии (статичную и резкопеременную)
- Разряд суперконденсаторного бустера на различные типы нагрузки (статичную и резкопеременную)

- Разряд гибридной системы накопления энергии на различные типы нагрузки (статичную и резкопеременную)

3 Результаты и обсуждение

Целью опытов являлась оценка целесообразности применения гибридных систем накопления энергии на основе суперконденсаторов при различных режимах ее работы. Основной метрикой данного исследования был максимальный ток разряда электрохимического накопителя, так как его высокие значения приводят к уменьшению срока эксплуатации АКБ.

В ходе исследования были проведены следующие опыты: саморазряда суперконденсаторного бустера, статичной нагрузки и импульсной нагрузки.

Опыт саморазряда суперконденсатора заключается в измерении скорости саморазряда конденсатора после его зарядки. Саморазряд происходит из-за утечки электрического заряда через материалы электродов и электролита, а также из-за внутреннего сопротивления конденсатора. Опыт проводится путём разрядки конденсатора до определённого уровня напряжения, близкого к 15% от номинального, так как после него разряд был незначительным. Итоговые данные саморазряда БСК-83 приведены на рисунке 3.

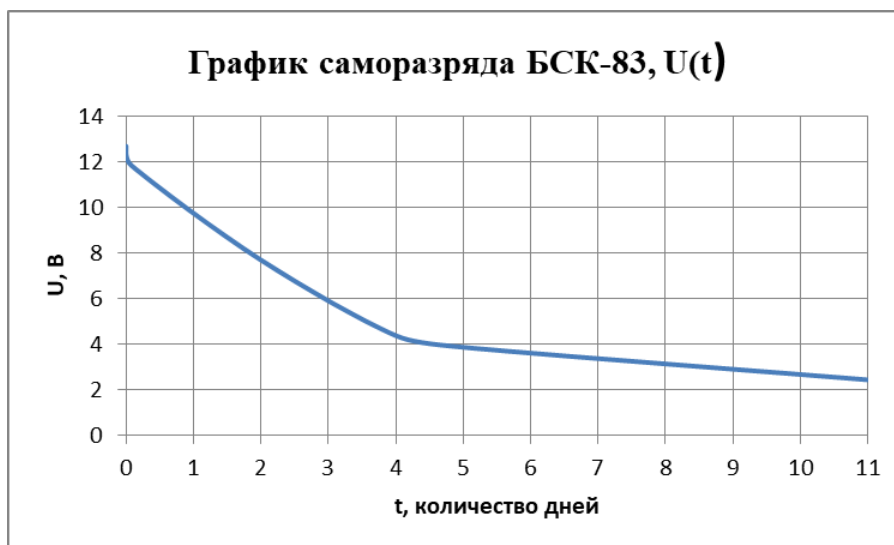


Рис. 3. График зависимости $U(t)$ при саморазряде БСК-83

Исследование режима разряда гибридной СНЭ на статичную нагрузку представляет из себя измерение токов, при включении ламп накаливания, с помощью датчиков ACS712-30A, на следующих участках. Таким образом мы имитируем работу СНЭ на постоянную нагрузку, например, осветительные или нагревательные приборы.

- 1) АКБ – БСК-83 (i_1)
- 2) СНЭ – инвертор (i_2)
- 3) Инвертор – нагрузка (i_3)

Было проведено 9 измерений при разных нагрузках. Начиная с холостого хода, заканчивая максимальной статической нагрузкой в 760 Вт. Получен график, изображенный на рисунке 4.

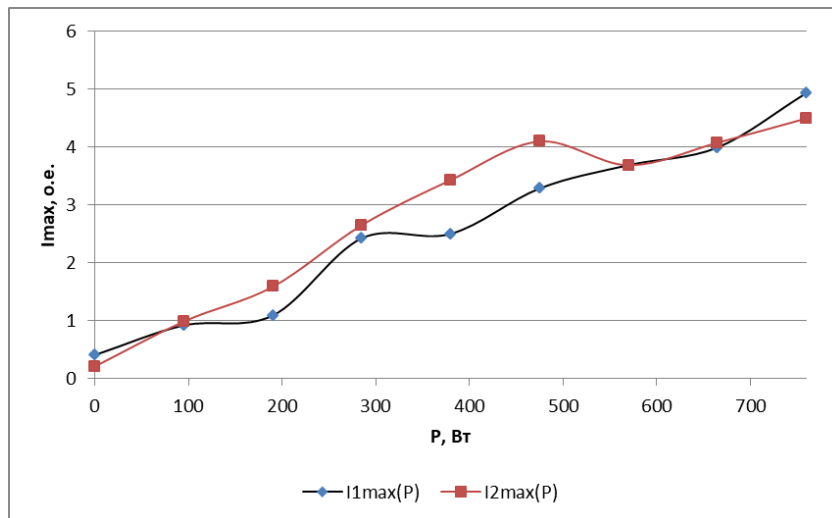


Рис. 4. График зависимости максимальных значений токов значениях нагрузки от 0 до 760 Вт

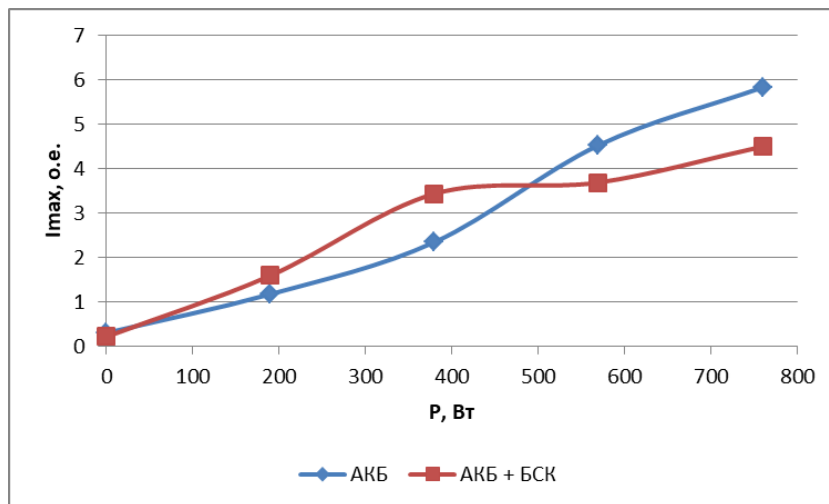


Рис. 5. Значения максимальных токов разряда АКБ при разных конфигурациях системы накопления энергии

В результате анализа данных графика, изображенного на рисунке 4, выявлено, что с увеличением нагрузки максимальный ток разряда АКБ все больше превышает максимальный ток разряда БСК-83. Это связано с тем, что при длительном установившемся режиме БСК-83 становится дополнительной нагрузкой для электрохимического накопителя. Но по причинам того, что при длительном установившемся режиме сами суперконденсаторы становятся дополнительной нагрузкой, поэтому гибридная СНЭ входит в режим перегрузки при нагрузке больше 475 Вт и не успевает достичь максимального значения, данная закономерность не прослеживается. Поэтому можно утверждать, что график справедлив для значений нагрузки до 475 Вт.

Импульсной нагрузкой на данном стенде является вибрационный насос «Малыш». Он имитирует работу СНЭ на резкопеременную нагрузку, по типу электродвигателей. Интерес в данном опыте представляет момент включения насоса, так как именно этот момент можно охарактеризовать как появление резкопеременной нагрузки.



Рис. 6. Мгновенные значения тока i_1 при запуске насоса «Малыш»

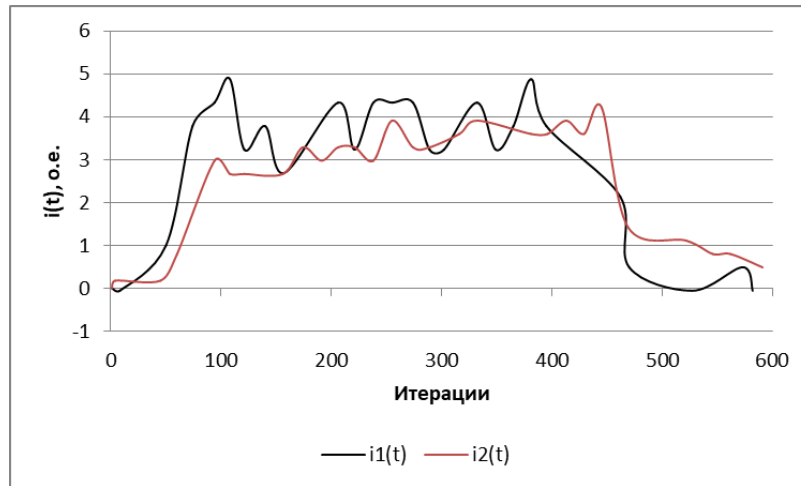


Рис. 7. Мгновенные значения токов i_1 , i_2 при работе насоса «Малыш»

На графике, изображенном на рисунке 6, видно, что в момент пуска насоса, а именно в промежутке от 90 до 110 итерации, ток разряда АКБ значительно меньше тока поступающего на инвертор. То есть, в момент пиковой (пусковой) нагрузки БСК-83 принимает большую часть нагрузки на себя, тем самым снижая ток разряда свинцового аккумулятора. Численное сравнение приведено в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение максимальных токов разряда компонентов гибридной СНЭ

$I_{max}^{БСК-83}$, о. е	$I_{max}^{АКБ}$, о. е
4,33	2,97

Также было проведено сравнение максимальных токов разряда АКБ при различных конфигурациях системы накопления энергии, традиционной, где используется электрохимический накопитель, и при гибридной.

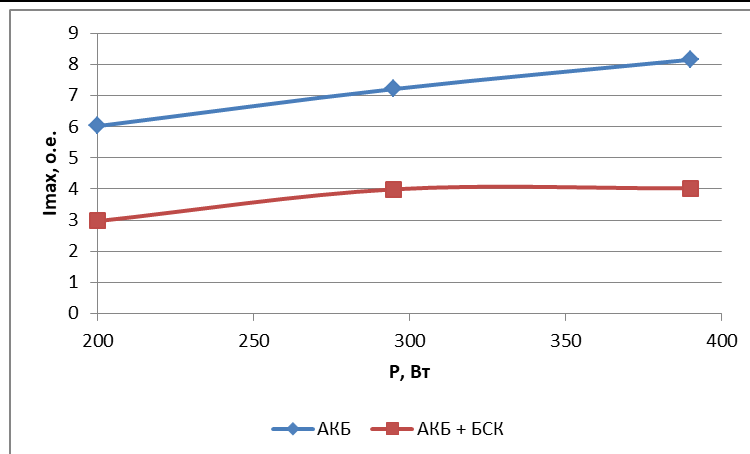


Рис. 8. Максимальные токи разряда аккумулятора во время включения комбинированной нагрузки при различных конфигурациях СНЭ

Проведя анализ полученного графика, можно утверждать, что во время импульсных или резкопеременных нагрузок, при использовании гибридной системы накопления энергии, возможно снизить максимальный ток разряда, практически в 2 раза, по сравнению с отдельно подключенным свинцово-кислотным аккумулятором. Это, в свою очередь, положительно сказывается на сроке службы аккумулятора.

4 Выводы

Исходя из результатов исследования можно утверждать, что для эффективной интеграции данных систем накопления энергии необходима система автоматического управления, которая способна распознавать разные виды нагрузки, и исходя из этого изменять конфигурацию СНЭ.

Литература

1. Технологии в машиностроении. Влияние импульсной нагрузки на емкость и срок службы батарей [] https://russianelectronics.ru/files/60279/ek2012_05_54-60.pdf
2. Совокупная установленная мощность объектов ВИЭ-генерации в России – [Электронный ресурс] // Ассоциация развития возобновляемой энергетики – URL: <https://tredda.ru> (дата обращения 24.03.2024)
3. Основные характеристики и технические возможности электрохимических накопителей энергии - [Электронный ресурс] // Журнал «Академик» - URL: <https://journal-academic.com/nashi-avtory/post/osnovnye-harakteristiki-i-tehnicheskie-vozmozhnosti-ektrohimicheskikh-nakopitelej-energii>

4. Перспективы рынка суперконденсаторов – [Электронный ресурс] // Commarket – URL: <https://commarket.ru/perspektivy-rynka-superkondensatorov/>
5. Supercapacitors Markets, Technology Roadmap, Opportunities 2021-2041 - [Электронный ресурс] // IDTechEx – URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/supercapacitor-markets-technology-roadmap-opportunities-2021-2041/768>
6. Arduino UNO [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Arduino – URL: <https://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno>
7. Renewable capacity statistics 2024 - [Электронный ресурс] // International Renewable Energy Agency – URL: <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024> (дата обращения 23.03.2024)
8. Анализ основных показателей современных суперконденсаторов и литийионных аккумуляторов для задач создания высокомоощных источников тока [Электронный ресурс] // РусБат – URL: <https://rusbat.com/Interbat22032017/IoffeInterbat2017.pdf>
9. Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры [Электронный ресурс] // Компоненты и технологии – URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/6212.pdf>

References

1. Technologies in mechanical engineering. Influence of pulse loading on battery capacity and life [] https://russianelectronics.ru/files/60279/ek2012_05_54-60.pdf
2. Total installed capacity of RES-generation facilities in Russia - [Electronic resource] // Renewable Energy Development Association - URL: <https://reda.ru> (accessed 24.03.2024)
3. Main characteristics and technical capabilities of electrochemical energy storage devices - [Electronic resource] // Journal 'Academician' - URL: <https://journal-academic.com/nashi-avtory/post/osnovnye-harakteristiki-i-tehnicheskie-vozmozhnosti-elektrohimicheskikh-nakopitelej-energii>.
4. Prospects of the market of supercapacitors - [Electronic resource] // Commarket - URL: <https://commarket.ru/perspektivy-rynka-superkondensatorov/>.
5. Supercapacitors Markets, Technology Roadmap, Opportunities 2021-2041 - [Electronic resource] // IDTechEx - URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/supercapacitor-markets-technology-roadmap-opportunities-2021-2041/768>
6. Arduino UNO [Electronic resource] // Official website of Arduino Company - URL: <https://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno>.
7. Renewable capacity statistics 2024 - [Electronic resource] // International Renewable Energy Agency - URL: <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024> (date of address 23.03.2024)
8. Analysis of the main indicators of modern supercapacitors and lithium-ion ac-batteries for the tasks of creation of high-power current sources [Electronic resource] // RusBat – URL: <https://rusbat.com/Interbat22032017/IoffeInterbat2017.pdf>
9. Panasonic Ionistors: physics, principle of operation, parameters [Electronic resource] // Components and technologies - URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/6212.pdf>

Study of Hybrid Energy Storage Systems Based on Supercapacitors

^{1,1} Nikita Romaniuk, ^{1,2} Alexey Vaskov, ^{1,3} Ksenia Andreeva, ^{1,4} Anastasia Vasileva

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russia

E-mail: ¹RomaniukNS@mpei.ru, ²VaskovAG@mpei.ru,
³AndreevaXA@mpei.ru, ⁴VasilyevaAAl@mpei.ru

Abstract: The article considers the potential of application of hybrid energy storage systems using supercapacitors and electrochemical accumulators in autonomous power systems. There is a description of a laboratory stand developed for experimental testing of a hybrid energy storage system, which allows to test the performance of the system under static and pulse loads. The experiments have shown that the use of supercapacitors in hybrid systems improves their efficiency.

Keywords: renewable energy sources, hybrid energy storage system, supercapacitors.