

Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в Арктической зоне Российской Федерации

О. С. Попель¹, доктор технических наук
Объединенный институт высоких температур РАН

С. В. Киселева², кандидат физико-математических наук
Научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии Географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Объединенный институт высоких температур РАН

М. О. Моргунова³, Т. С. Габдрахманова⁴, А. Б. Тарасенко⁵
Объединенный институт высоких температур РАН

Рассмотрены некоторые аспекты использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для энергоснабжения Арктической зоны Российской Федерации. Приведена краткая характеристика территории с точки зрения энергопотребления, выделены некоторые ниши, перспективные для энергообеспечения на основе ВИЭ. Представлены результаты оценки ресурсов солнечной энергии территории. Расчеты проведены с использованием многолетних актинометрических наблюдений, а также международных тематических баз данных, построенных на основе математического моделирования приходящей радиации и результатов спутниковых наблюдений (проект NASA SSE). Описан разработанный авторами проект портативной энергоустановки двух типов: на основе гибких фотоэлектрических модулей и накопителя электрической энергии, а также гарантированного источника питания (бензоагрегат, водородно-воздушный топливный элемент). Охарактеризованы особенности использования накопителей энергии в суровых условиях арктического региона.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, арктический регион, потребление энергии, ресурсы солнечной энергии, источники актинометрических данных, портативная солнечная энергоустановка, фотоэлектрические модули, аккумуляторы.

Введение

Освоение Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), сформулированное как одно из ключевых направлений развития российской экономики в XXI в., является сложной комплексной задачей, требующей разработки ряда технических решений, в том числе в области эффективного энергоснабжения действующих и планируемых к созданию

промышленных и инфраструктурных объектов, а также развивающихся местных поселений. С одной стороны, существует проблема доставки в регион и внутри него необходимых ресурсов, в том числе горюче-смазочных материалов и запасных частей, которая осложняется суровым климатом и слаборазвитой транспортной инфраструктурой. С другой стороны, арктический регион является источником не только полезных ископаемых, но и пищевых и рекреационных ресурсов, зоной проживания коренных народов Севера. К нему приковано внимание средств массовой информации и экологических организаций, что заставляет уделять пристальное внимание экологическим аспектам реализуемых и планируемых в регионе проектов. Не претендуя на полное решение

¹ e-mail: o_popel@oivtran.ru.

² e-mail: k_sophia_v@mail.ru.

³ e-mail: maymorgunova@rambler.ru.

⁴ e-mail: tkaceva91@yandex.ru.

⁵ e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com.

энергетических проблем региона, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) могут быть эффективным средством решения ряда локальных энергетических задач при условии корректного учета потенциала этих ресурсов, технико-экономического анализа конкурирующих решений и правильного выбора ключевых компонентов энергоустановок, работоспособных в суровых условиях Арктики.

Арктический регион располагает широким спектром ВИЭ. Среди них ключевыми являются энергия ветра (районы вдоль северных морских границ России характеризуются средними скоростями ветра более 6—7 м/с, что крайне привлекательно для применения ветроэнергетических установок), солнечная энергия, в отдельных районах — энергия растительной биомассы, энергия морских волн и приливов. Ведутся поисковые исследования по энергетическому использованию разности температур морской воды и атмосферного воздуха, разности соленостей морской и речной воды. В некоторых районах имеются разведанные запасы геотермального тепла. В одной статье не представляется возможным рассмотреть весь спектр перспективных технологий использования местных ВИЭ. В этой связи в данной работе основное внимание уделяется некоторым результатам, полученным авторами в рамках программы «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» в части анализа возможностей практического применения солнечной энергии.

Характеристика территории и потенциальных потребителей

Территория Арктической зоны Российской Федерации составляет 4386,6 тыс. км², или 25,7% общей площади страны. Численность населения — более 2,5 млн человек, что составляет менее 2% населения страны и около 40% населения всей Арктики [1]. АЗРФ имеет низкую плотность населения и высокую дисперсность расселения. Арктика крайне неоднородна также по уровню интенсивности хозяйственной деятельности и по инфраструктурной освоенности. Большую часть территории АЗРФ составляют районы с плотностью населения менее 1 человека на 1 км² и экстремально низким уровнем экономической активности. Однако АЗРФ отличается самой высокой урбанизированностью: более 80% населения проживает здесь в городах и поселках с населением свыше 5 тыс. человек [2]. Здесь расположен ряд промышленных центров с населением свыше 100 тыс. человек (Архангельск, Мурманск, Воркута, Норильск).

Большой интерес к региону в настоящее время связан с возможностью добычи полезных ископаемых, прежде всего газа и нефти. Таким образом, одним из приоритетных энергопотребителей являются системы, связанные с разведкой, освоением месторождений и добычей природных ресурсов. Речь идет о буровых установках, в том числе морского

базирования, насосах, обеспечивающих извлечение нефти, вахтовых поселках персонала. В ряде регионов — в Мурманской области, Республике Саха (Якутия), Эвенкийском районе Красноярского края — развивается добыча руд, созданы или строятся горно-обогатительные комбинаты. В Архангельской области одним из наиболее развитых секторов является лесная промышленность, которая, правда, в последнее время страдает от истощения ресурсно-сырьевой базы. Это связано с отсутствием адекватного лесовосстановления в периоды освоения тайги, что привело к увеличению плеча доставки сырья к комбинатам и портам до величин, ведущих к потере рентабельности производства. Вместе с тем старые вырубки зарастают так называемыми пионерными породами деревьев (березой, осиной, ольхой), не имеющими большой ценности как сырье собственно для лесного сектора, но их можно использовать в качестве сырья pelletного производства (прессованные отходы древесного производства) [3]. Таким образом, частично могут быть удовлетворены потребности региона в сырье для производства тепловой энергии, проблема получения которой столь же актуальна, как и получение электроэнергии, и сохранены рабочие места для жителей отдаленных поселков области.

Рыбная отрасль также является достаточно важным сегментом экономики региона. Здесь в качестве основных потребителей энергии могут рассматриваться верфи и порты, обслуживающие рыболовческий флот, предприятия по первичной переработке рыбы и поселки персонала. Оленеводство — один из основных промыслов многих кочевых народов Севера. Оно предполагает длительное пребывание семей в тундре при отсутствии централизованной сети. Вместе с тем в такие периоды эти люди должны быть обеспечены связью и освещением. В настоящее время для этих целей используются мобильные бензоагрегаты, выбросами отработанных газов и разливами топлива наносящие тяжелый ущерб хрупкой природе северной тундры. Важно отметить, что выпас оленей обычно происходит в течение полярного дня, что открывает возможности для использования солнечной энергии для этих целей. Известны пилотные проекты в этой области, реализованные в Нижнеколымском улусе Республики Саха (Якутия) [4].

Обеспечение безопасности движения всех видов транспорта особенно важно в данном регионе с учетом наличия международных торговых коммуникаций (Северного морского пути) и большой зависимости населенных пунктов от доставляемых водными, наземными и воздушными путями грузов. Для навигационных целей широко используются автономные светосигнальные устройства: буи, маяки, аэродромные огни.

Для отдельных населенных пунктов, не имеющих промышленных предприятий, график электрической нагрузки во многом определяется насосами

системы отопления поселка — котельных установок, работающих на дровах, мазуте или угле. Это определяет существенную сезонную неравномерность энергопотребления. Отклонение реального энергопотребления от графиков нагрузки режимного дня составляет от 11% до 56%, причем максимум отклонения приходится на летние месяцы. Связано это с тем, что для зимы характерны стабильно низкие температуры воздуха, а в весенне-летний и осенний периоды средняя температура от месяца к месяцу претерпевает существенные изменения, что влечет за собой сдвиг графика нагрузки. В результате отклонение реальных нагрузок от используемых в расчетах энергетических балансов показателей по летнему режимному дню может составлять 40—50%.

Предпосылки использования и оценка ресурсов солнечной энергии в арктическом регионе

Как следует из приведенного выше краткого анализа, в АЗРФ имеются разнообразные потенциальные ниши для практического использования солнечной энергии. С учетом высокоширотного расположения потребителей, безусловно, речь может идти только о сезонном наземном использовании солнечной энергии в периоды солнечного сияния.

Бытует устойчивое мнение, что на Севере использование солнечной энергии неперспективно в связи с ее малыми ресурсами. Однако такое утверждение не вполне правомерно. Известно, что суммарная продолжительность световых периодов в течение года для любой точки земного шара одинакова и равна суммарной продолжительности ночей. В высоких широтах максимум продолжительности солнечного сияния приходится на лето (за полярным кругом — на полярный день), в то время как в экваториальной зоне продолжительности дней и ночей в течение всего года примерно одинаковы. Таким образом, за пределами атмосферы интегральный годовой поток солнечного излучения, направленный на подвижную ориентированную на Солнце единичную площадку, в любой точке земного шара одинаков. И поступление энергии солнечного излучения на такую площадку, расположенную на поверхности Земли, определяется в первую очередь не широтой местности, а прозрачностью слоя атмосферы, через который проникают солнечные лучи. Для районов земного шара, расположенных в высоких широтах, толщина проходимого солнечным излучением атмосферного слоя выше, чем в низких широтах, в связи с более низким солнцестоянием над горизонтом. Кроме того, поступление энергии солнечного излучения к поверхности Земли определяется влагосодержанием атмосферы, наличием облачности и рядом других характеристик воздушной среды. Отметим, что, например, в центральных районах Антарктиды, расположенных в окрестностях южного полюса (станция «Восток») на высоте над уровнем моря около 4 км и характеризующихся постоянно

господствующими антициклонами с низкой отрицательной температурой воздуха, обуславливающей вымораживание влаги, в летние дни регистрируются потоки солнечного излучения на площадку, ориентированную на Солнце, на уровне 1,1—1,2 кВт/м², что близко к предельному заатмосферному значению около 1,4 кВт/м². Интересно также, что там же потоки солнечного излучения на вертикальные поверхности северной ориентации с учетом отраженного от снежного покрова излучения иногда достигают 1,6—1,7 кВт/м² и оказываются больше солнечной постоянной.

Для целей проектирования и прогноза эффективности работы солнечных установок необходимы надежные данные о падающей солнечной радиации с максимальным охватом территории и частотой сетки. В настоящее время доступны лишь ограниченные результаты наземных актинометрических измерений в этом регионе в виде осредненных данных, опубликованные, например, в [5]. В этом издании приведены данные по солнечной радиации, полученные на актинометрических станциях, большинство которых расположено в основном на побережье морей и островах Северного Ледовитого океана.

Накопленный опыт успешного использования базы данных NASA SSE [6] при оценке ресурсов солнечной энергии на территории Российской Федерации [7; 8], а также при решении задач проектирования солнечных энергетических установок дает основание для использования данных NASA и для оценки ресурсов солнечной энергии в арктическом регионе. На рис. 1 в качестве примера приведена карта распределения среднесуточных сумм прямой солнечной радиации, поступающей на следящую за Солнцем поверхность в течение года, построенная по данным NASA. Видно, что в арктической зоне среднегодовое дневное поступление энергии прямого солнечного излучения варьируется от 2 до 5 кВт·ч/(м²день), или от 0,7 до 1,8 МВт·ч/(м²год) (от 60 до 150 кг/(м²год) условного топлива). Этот энергетический потенциал солнечной энергии существенен и пригоден для практического использования. Для сравнения: среднесуточное поступление солнечной энергии в южных районах Германии, где солнечные установки находят широкое применение, составляет всего около 3,4 кВт·ч/(м²день). В ясные летние дни во многих районах Арктики текущее поступление солнечной энергии на неподвижные ориентированные на юг приемные поверхности с оптимальным углом наклона к горизонту могут достигать 6—8 кВт·ч/м², что соизмеримо с поступлениями энергии солнечного излучения в южных районах страны.

Важен вопрос об адекватности базы данных NASA реальной ситуации. Чтобы ответить на этот принципиальный вопрос, нами была проведена оценка погрешности данных NASA SSE в АЗРФ на основе сравнения (верификации) с результатами наземных метеорологических измерений [5]. Сравнение проводилось по следующим характеристикам:

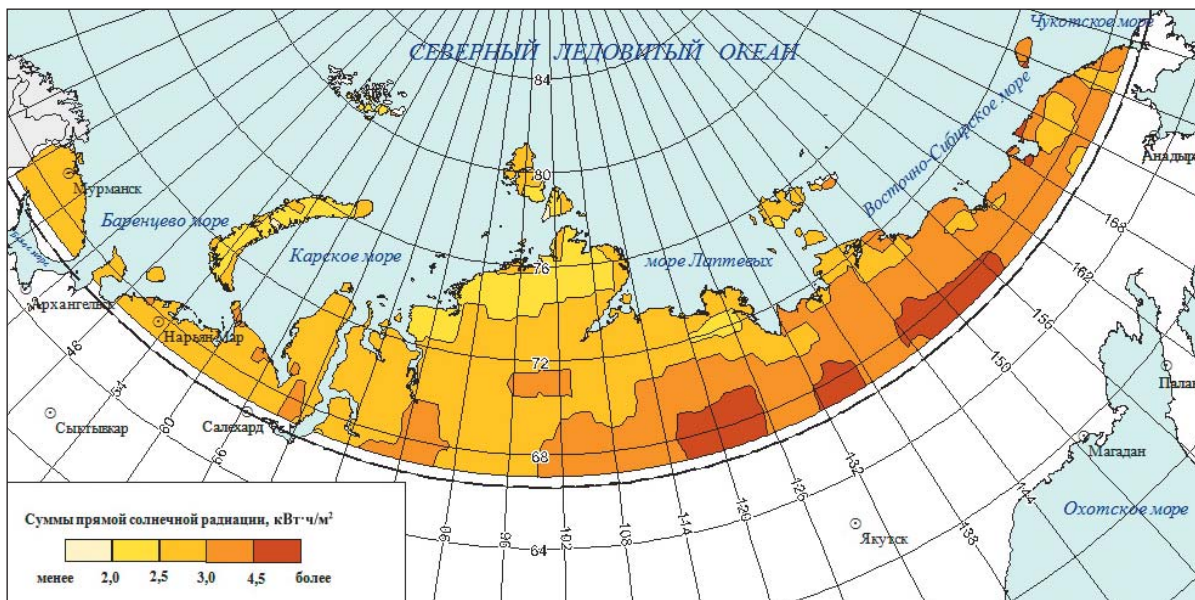


Рис. 1. Распределение среднесуточных сумм прямой солнечной радиации в кВт·ч/(м²·день), поступающей на следящую за Солнцем поверхность. Арктическая зона Российской Федерации. Карта построена по данным NASA научным сотрудником Научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии Географического факультета МГУ Ю. Ю. Рафиковой

- среднегодовые суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при средних условиях облачности;
- среднегодовые суммы прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность при средних условиях облачности.

При верификации были определены средние, максимальные и минимальные отклонения суммарной солнечной радиации для точек, максимально близких по географическому положению. Было установлено, что максимальное отклонение среднегодовых значений сумм суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность имеет место для метеообсерватории им. Кренкеля (80,44° с. ш., 58,01° в. д.), минимальное отклонение — для станции на острове Преображения (74,66° с. ш., 112,97° в. д.). Среднее значение отклонения данных NASA от результатов наземных измерений составляет 0,47 кВт·ч/(м²·сут). Среднее значение отклонения по прямой солнечной радиации на нормальную поверхность равно 1,47 кВт·ч/(м²·сут), минимальное среднее отклонение — 0,75 кВт·ч/(м²·сут) (метеообсерватория им. Кренкеля), максимальное среднее отклонение — 2,42 кВт·ч/(м²·сут) (метеообсерватория на острове Визе).

Максимальное отклонение актинометрических данных о прямой радиации приходится на летние месяцы — июнь, июль, август. Для зимних месяцев NASA SSE дает, как правило, заниженные данные, а для летних — завышенные. Для суммарной радиации максимальное отклонение наблюдается также в летние месяцы, преимущественно в августе, для зимних месяцев NASA предоставляет несколько

заниженные данные, для летних — завышенные. В целом отклонение значений NASA и наземных метеообсерваторий по суммарной солнечной радиации существенно меньше, чем по прямой радиации.

Зависимости величины погрешности от широты места расположения метеостанции не обнаружено: для прямой солнечной радиации станции с максимальной и минимальной погрешностью находятся на соседних широтах — 79° и 80° с. ш. соответственно. По суммарной солнечной радиации станция с максимальным отклонением находится на широте 80°, с минимальным — на широте 74°.

Таким образом, верификация различных источников данных (NASA SSE и наземные измерения) показала, что если средние и минимальные отклонения среднемесячных значений суммарной радиации сопоставимы с таковыми в более южных широтах России [7], то максимальные отклонения гораздо больше и могут достигать 50% величины. Это обуславливает необходимость при использовании данных NASA SSE проводить расчеты величины падающей солнечной радиации и иных производных энергетических показателей в терминах максимальных и минимальных оценок.

Портативная солнечная энергоустановка для арктических применений

Одним из наиболее эффективных и практически значимых применений солнечных установок в условиях Арктики могло бы стать обеспечение энергопотребностей некоторых групп, вынужденных длительное время находиться вне зоны действия локальных или централизованных электросетей (охотников, геологов,

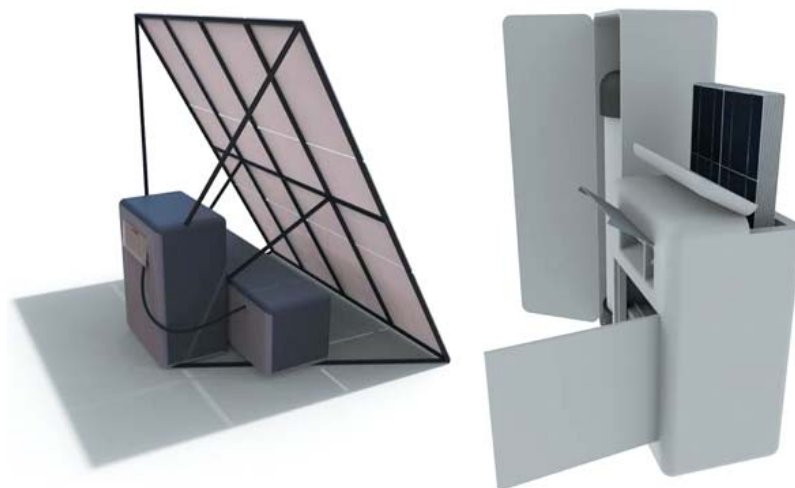


Рис. 2. Внешний вид портативного источника питания (справа – транспортировочное положение, слева – рабочее положение при расположении модулей под углом 71° к горизонту)

туристов, оленеводов и др.). В рамках выполнения исследований по упомянутой выше программе РАН нами разработан проект портативной энергоустановки на основе гибких фотоэлектрических модулей и накопителя электрической энергии, а также гарантированного источника питания (бензоагрегат, водородно-воздушный топливный элемент). Установка может применяться для питания осветительных устройств и средств связи. Параметры установки:

- напряжение питания — 1,5—3,75, 7,4, 12, 24 В (постоянный ток), 220 В (переменный ток, опция);
- пиковая мощность — до 240 Вт (до 15 мин — перегрузка на уровне до 1 кВт);
- длительная мощность — 20 Вт.

Первичным источником энергии служит солнечная батарея из гибких монокристаллических фотоэлектрических модулей. По сравнению с уже применяемыми в Якутии модулями каркасной конструкции с защитными стеклами гибкие модули существенно легче и безопаснее при транспортировке. Применен буферный накопитель на основе литий-ионных аккумуляторов. Возможны варианты исполнения с минимальной рабочей температурой 0°С и -30°С, для чего используются разные виды аккумуляторов (см. следующий раздел), что также существенно улучшает массогабаритные характеристики. Для продолжительных бессолнечных периодов предусматривается резервный источник питания на основе водородно-воздушного топливного элемента (в специальном исполнении) или бензоагрегата (для гражданских применений). Источник водорода в случае топливного элемента — картридж-генератор на основе гидролиза боргидрида натрия. Разогрев системы производится за счет теплового эффекта реакции; перед отключением топливного элемента катодный электрод должен быть продут подогретым воздухом для частичного осушения во избежание замерзания. Внешний вид энергоустановки представлен на рис. 2.

Источник питания ориентирован на сезонное применение в светлое время года. Потенциальными потребителями для него являются средства связи, портативная электроника, рации, зарядные устройства

переносных аккумуляторных батарей различного назначения. При комплектации устройства шестью гибкими фотоэлектрическими модулями пиковой мощностью 140 Вт каждый и аккумуляторной батареей на основе литий-наноитанатных аккумуляторов энергоемкостью 1,3 кВт·ч система работоспособна при температурах до -30°С. Средняя располагаемая мощность в условиях северной Якутии варьируется от 80 (февраль) до 150 (апрель) Вт, что достаточно для питания средств связи и малой портативной электроники. Масса устройства — около 60 кг, пиковая мощность (при разряде аккумуляторной батареи в течение часа) — 1,3 кВт. В январе, ноябре и декабре устройство неработоспособно из-за отсутствия солнечной радиации. При использовании топливного элемента в качестве гарантирующего источника электропитания при потребляемой мощности 20 Вт устройство может работать в течение 25 сут, при этом масса установки увеличивается до 75 кг. Замена аккумуляторов на более энергоемкие обеспечивает следующие характеристики:

- минимальная рабочая температура — -10°С;
- масса устройства с топливным элементом и источником водорода — 41 кг;
- масса устройства без топливного элемента и источника водорода — 32 кг;
- время автономной работы в бессолнечные периоды с использованием топливного элемента (потребляемая мощность 20 Вт) — 25 сут;
- располагаемая мощность — 124—155 Вт;
- пиковая мощность в течение 1 ч — 2 кВт.

Следует отметить, что в рассматриваемых условиях устройство с более энергоемкими аккумуляторами работоспособно с мая по сентябрь включительно (с учетом температурного режима аккумуляторной батареи).

Особенности использования накопителей энергии в арктических условиях

Создание солнечных и ветровых энергоустановок с нестабильной выработкой энергии сопряжено с необходимостью оснащения их накопителями энергии.

Среди электрохимических накопителей энергии лидером по объемам производства и инсталляции остаются свинцово-кислотные аккумуляторы, популярность которых обеспечивается освоенными конструкцией и технологией производства, а также относительно дешевой [9]. Обычно используются заливные аккумуляторы, аккумуляторы панцирного типа (OpzV), аккумуляторы солнечных серий [10], гелевые аккумуляторы с плоскими пластинами, аккумуляторы с инкапсулированным в стекловолоконной матрице электролитом (AGM). Эти типы аккумуляторов существенно различаются ресурсом и стоимостью, причем наиболее дорогим и качественным решением являются аккумуляторы панцирного типа. Проблема ресурса, предельных токов и допустимой глубины разряда — ключевая для данного типа накопителей. Важным обстоятельством также является то, что для работы со свинцово-кислотными аккумуляторами (в плане диапазонов рабочих напряжений, напряжений отсечки и повторного подключения, а также формы зарядной кривой) адаптировано большинство контроллеров заряда и инверторов, присутствующих на рынке.

Литий-ионные аккумуляторы привлекают внимание разработчиков в самых разных областях техники своими свойствами, существенно превосходящими (прежде всего по удельным и ресурсным показателям) аналогичные характеристики других электрохимических систем. К настоящему времени разработано и применяется большое количество разновидностей электродных материалов для литий-ионных аккумуляторов, придающих им те или иные свойства [11]. Несомненными достоинствами литий-ионных аккумуляторов, определяющими перспективы их применения в стационарных энергоустановках на ВИЭ, являются не столько удельные характеристики, сколько высокая допустимая глубина разряда при сохранении приемлемых ресурсных характеристик. Среди всех разновидностей литий-ионных аккумуляторов наибольшее внимание привлекает система $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}||\text{NMC}$, где NMC — смесь литированных оксидов кобальта, марганца и никеля.

В рамках анализа накопителей электрической энергии и материалов для них с учетом арктических условий проведены климатические испытания двух видов литий-ионных аккумуляторов. Экспериментально подтверждена перспективность использования литий-ионных аккумуляторов с нанотитанатным анодом для работы в энергоустановках при температурах окружающей среды до -30°C без затрат энергии на подогрев контейнера с накопителем электрической энергии. Режим охлаждения аккумулятора в циклах заряда-разряда предполагал, что в реальных условиях температура окружающей среды меняется относительно плавно, а не скачком. Было показано, что аккумулятор системы $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}||\text{NMC}$ сохраняет практически всю емкость в режиме плавного охлаждения и около двух третей — в режиме предварительного охлаждения.

Вторая разновидность аккумуляторов ($\text{LiC}_6||\text{LiFePO}_4$) оказалась слаботребовательной в обоих режимах из-за существенного снижения емкости относительно номинальной. Такой же результат получен для свинцово-кислотных систем. При очевидной перспективности использования литий-ионных аккумуляторов с нанотитанатным анодом следует отметить необходимость дальнейшего снижения их стоимости либо применения литий-железофосфатных аккумуляторов в теплоизолированных контейнерах.

Литература

1. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка подпрограммы государственной программы Российской Федерации “Экономическое и социальное развитие Арктической зоны Российской Федерации на 2011—2020 годы” в Республике Саха (Якутия)» // <http://www.sakha.gov.ru/en/node/65700>.
2. Пулясов А. Н. Контуры стратегии развития Арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. — 2011. — № 1. — С. 38—47.
3. Леса Архангельской области истощены на 23% // <http://lesvesti.ru/news/news/5791/>.
4. Таюрский В. Якутских оленеводов переводят на солнечные батареи // <http://www.rg.ru/2009/03/12/reg-dvostok/sun-anons.html>.
5. Научно-прикладной справочник по климату России (арктический регион): Солнечная радиация. — СПб.: Гидрометеиздат, 1997. — 238 с.
6. Surface meteorology and Solar Energy. A renewable energy resource web site (release 6.0) // <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>.
7. Попель О. С., Фрид С. Е., Колomieц Ю. Г. и др. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. — М.: Изд-во МФТИ, 2010. — 83 с.
8. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): Учебное пособие / О. С. Попель и др. — М.: Изд-во МФТИ, 2010. — 56 с.
9. Тарасенко А. Б. Накопители электрической энергии для систем на основе ВИЭ: современное состояние и перспективы развития // Материалы восьмой всероссийской научной молодежной школы с международным участием. — М.: Унив. кн., 2012. — С. 148—185.
10. Шютц М. Презентация компании BAE Batterie GmbH в докладах Международной научно-практической конференции «Возобновляемая энергетика в изолированных системах Дальнего Востока России», 28 июня 2013 г., Якутск.
11. Scrosati B., Garche J. Lithium batteries: Status, prospects and future // J. of Power Sources. — 2010. — Vol. 195. — P. 2419—2430.