

## МОБИЛЬНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

**А. Б. Тарасенко**

Объединенный институт высоких температур РАН (Москва, Российская Федерация)

**Я. А. Меньшиков**

ООО «Яростанмаш» (Москва, Российская Федерация)

**М. Ж. Сулейманов**

Объединенный институт высоких температур РАН (Москва, Российская Федерация)

**С. В. Киселева**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 13 марта 2020 г.

*Рассматривается задача создания мобильных систем энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии для автономного потребителя, в том числе в Арктической зоне Российской Федерации (оленьеводческие хозяйства, геологические партии, туристические группы и др.). Описаны алгоритм и характеристики разработанного авторами фотоэлектрического источника питания, адаптированного к эксплуатации в условиях низких температур и содержащего высокоэффективные гетероструктурные кремниевые фотоэлектрические преобразователи, литий-ионные аккумуляторы с подогревателем и программируемый контроллер заряда с функцией экстремального регулирования мощности.*

**Ключевые слова:** портативный источник питания, фотоэлектрический преобразователь, литий-ионный аккумулятор, контроллер заряда, экстремальное регулирование, климатические испытания.

### Введение

Разработка портативных источников питания, использующих энергию возобновляемых источников, ведется достаточно давно. Основная мотивация — сделать электропитание растущего спектра электронных устройств доступным в отрыве от централизованной сети с минимальной экологической нагрузкой, поскольку часто подобные устройства должны использоваться в рекреационных зонах или регионах с особым режимом природопользования. Значительную актуальность использование эколо-

гичных и эффективных источников электропитания приобретает в условиях хрупкой природы Арктической зоны России. Существенной нишей использования таких устройств являются потребители мощностью до 1—2 кВт, где бензогенераторы используются редко из-за ограничений по КПД и сроку службы вследствие работы на неполной нагрузке [1]. Использование возобновляемых источников энергии или водородных технологий позволяет существенно расширить длительность работы источника питания в отсутствие централизованной сети или ископаемого топлива.

Возможность создания автономной мобильной системы электроснабжения, использующей солнеч-

ную энергию, для кочевых оленеводческих хозяйств Крайнего Севера рассмотрена в [2]. Эффективность работы автономных систем электроснабжения рассмотрена для 16 вариантов режима электропотребления в двух географических точках — в Южной Якутии и норвежской провинции Финнмарк. Выполненные с использованием программного обеспечения HOMER [3] расчеты показали, что практически для всех сценариев солнечная энергоустановка оказывается выгоднее привозного органического топлива, однако в этом случае необходим массовый переход на светодиодные лампы на стойбищах и для регионов с низким уровнем инсоляции для ограничения потребления электроэнергии. При этом возможно достижение массогабаритных параметров системы (в зависимости от численности оленеводов на стойбище) от 5,8 до 11 кг/чел. с возможностью транспортировки ее на оленьей упряжке.

Мобильный дом на базе автомобильного прицепа рассмотрен в [4]. Состав автономной системы энергоснабжения рассчитан на основе актуальных климатических данных по солнечной радиации и доступности ветра с привязкой к месту использования. Свинцово-кислотная аккумуляторная батарея служит для согласования графиков потребления и производства энергии, электрохимический генератор на топливных элементах входит в состав системы на правах источника бесперебойного питания. Водород для топливных элементов поступает из баллонов, перезарядка которых электролизером не предусмотрена.

Вопросы энергоснабжения средних и малых туристических лагерей (до 100 мест) с использованием возобновляемых источников энергии рассмотрены в [5] для трех подобных объектов на территории Австралии. Использованы реальные графики нагрузки, моделирование работы установок различного состава проведено с использованием программного обеспечения HOMER [3]. Наилучшую гарантированность энергоснабжения согласно [5] обеспечивает комбинация ветроустановок с дизель-генераторами (по сравнению с солнечными установками). Использование системы, не потребляющей ископаемое топливо, для рассмотренных условий не является целесообразным как по экономическим соображениям, так и в аспекте гарантированности энергоснабжения.

Автономное энергоснабжение малых мобильных групп чрезвычайно актуально и для арктических регионов России. При этом часто важны как надежность энергоснабжения, так и массогабаритные характеристики. В таком случае использование дизель-генераторов, несмотря на их надежность и независимость от погодных условий, может быть неадекватно требованиям потребителей. В результате ставится задача разработки источников питания, способных устойчиво выдерживать заявленные технические характеристики и легко перемещаемых даже при отсутствии транспортных средств, а также

максимально эффективно использующих местные возобновляемые энергоресурсы.

Одно из требований к таким источникам автономного энергоснабжения, работающим в северных условиях и содержащим накопитель электрической энергии, — стабильная работа при отрицательных температурах. Наиболее надежным вторичным источником энергии с точки зрения диапазона рабочих температур являются двойнослойные электрохимические суперконденсаторы [6], однако их удельная энергоемкость крайне мала относительно требуемых величин. Литий-ионные аккумуляторы удовлетворяют требованиям высокой энергоемкости, соответствующим портативным применениям, однако их энергоотдача существенно падает при отрицательных температурах [7]. Кроме того, наиболее энергоемкие из них нельзя заряжать в этих условиях во избежание дендритообразования [8]. Наиболее устойчивыми являются аккумуляторы с литированным наноструктурированным титанатом в виде материала отрицательного электрода, однако их удельные характеристики оставляют желать много лучшего, что немаловажно для портативных применений, а при отрицательных температурах их энергоотдача также падает, хоть и в меньшей степени, чем у других систем аккумуляирования [9]. Указанные проблемы и недостатки мобильных портативных источников питания были в значительной степени преодолены в предложенной авторами схеме. Представленная работа описывает экспериментальный образец портативного фотоэлектрического источника питания, результаты оценки его работоспособности в различных климатических условиях разных регионов России, в том числе в Арктической зоне.

## Материалы и методы

**Обоснование состава портативного источника питания.** Компактный носимый источник электропитания, работоспособный в климатических условиях всей территории Российской Федерации, должен работать в широком диапазоне температур, обладая при этом высоким массогабаритным совершенством. Солнечная энергия была выбрана в качестве первичного источника, так как доступна повсеместно в отличие от весьма непостоянной (особенно на малой высоте) энергии ветра. В качестве накопителя электрической энергии выбраны литий-ионные аккумуляторы с углеродным анодом как наиболее энергоемкая электрохимическая система, способная обеспечить высокие массогабаритные характеристики. Солнечная батарея выполнена в виде двух соединяемых параллельно складных фотоэлектрических модулей пиковой мощностью 111 Вт и рабочим напряжением 34 В каждый на основе гетероструктурных кремниевых фотоэлектрических преобразователей производства ГК «Хевел» с паспортным КПД 19—20% [10]. Благоприятный тепловой режим аккумуляторной

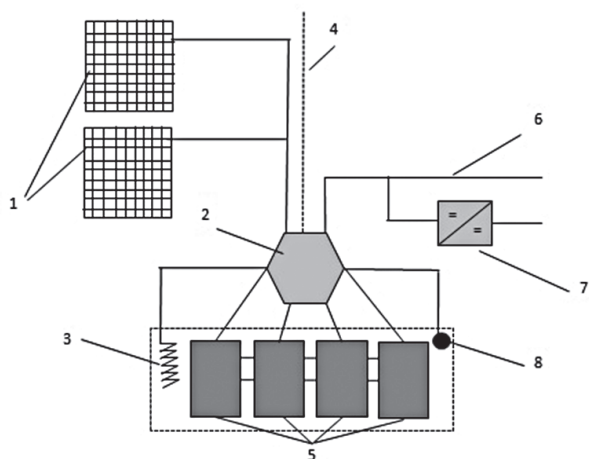


Рис. 1. Блок-схема портативного фотоэлектрического источника питания: 1 – складная солнечная батарея, 2 – контроллер заряда, 3 – нагреватель аккумуляторной батареи, 4 – информационный вход интерфейса RS485, 5 – литий-ионные аккумуляторы, 6 – нагрузочный выход на 14 В, 7 – понижающий преобразователь постоянного тока 12/5 В  
 Fig. 1. Flow chart of a portable photovoltaic power supply. 1 – a folding solar battery, 2 – a charge controller, 3 – a battery heater, 4 – an information input of the RS485 interface, 5 – lithium-ion batteries, 6 – a load output of 14 V, 7 – a step-down DC/12/5 V converter

батареи на основе смешанных литированных оксидов и углерода ( $\text{LiC}_6\|\text{LiNMC}$ ) обеспечивается путем прогрева ее перед зарядом. Для этого контроллер заряда, являющийся ядром портативного источника и сосредотачивающий в себе функции системы управления и согласующего преобразователя напряжений солнечной и аккумуляторной батарей, имеет возможность питать собственные нужды как от аккумуляторной батареи, так и (в случае ее глубокого разряда или охлаждения ниже заданной температуры) от солнечной батареи. Это

существенно увеличивает надежность системы преобразования и управления источника по сравнению с аналогичными коммерческими изделиями, имеющими питание для собственных нужд только от аккумуляторной батареи [11]. Другими функциями, реализованными в контроллере, являются алгоритм экстремального регулирования мощности солнечной батареи, позволяющий увеличить выработку энергии на 15—20% [12], и функция отключения нагрузки при разряде ниже заданной уставок любого из параллельно соединенных элементов аккумуляторной батареи аналогично [13]. Так же, как и в [13], система балансировки напряжений на элементах аккумуляторной батареи интегрирована в контроллер. Блок-схема источника представлена на рис. 1.

Аккумуляторная батарея с контроллером размещена в теплоизолированном корпусе источника. Рассев избыточного тепла при работе контроллера осуществляется по площади крышки источника за счет формирования слоя теплопроводной пасты между контроллером и верхней частью корпуса.

Экспериментальный образец также имеет возможность коммутации внешнего персонального компьютера для программирования контроллера заряда с заданием необходимых уставок по предельным температурам и напряжениям аккумуляторной батареи и мониторинга работы устройства. Предполагается, что на серийных образцах данный вход будет использоваться только на предприятии-изготовителе после монтажа контроллера и его присоединения к аккумуляторной батарее. Внешний вид источника представлен на рис. 2.

**Экспериментальные работы по определению работоспособности компонентов источника в условиях пониженных температур.** Как показано выше, аккумуляторная батарея — самое слабое место портативных источников электропитания в условиях пониженных температур. Она же во

многом определяет работоспособность источников, зависящую от возможности батареи принять или отдать заряд. Для оценки работоспособности источника при пониженных температурах был выполнен ряд экспериментов в модельных условиях.

Прежде всего для оценок затрат энергии источником питания на нагрев аккумуляторов была определена фактическая теплоемкость аккумуляторной батареи (системы  $\text{LiC}_6\|\text{LiFePO}_4$  в типоразмере 18650), включающей в себя весьма разнородные материалы (алюминиевый корпус, алюминиевую и медную фольгу электродов, углерод-полимерные и оксид-полимерные элект-



Рис. 2. Внешний вид источника питания на лабораторных испытаниях  
 Fig. 2. External view of the power supply in laboratory tests

Таблица 1. Параметры испытываемых аккумуляторов

Электрохимическая система	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, кг	Емкость при НКУ, Вт·ч	Удельная емкость, Вт·ч/кг	Стоимость, руб.	Удельная стоимость, долл./Вт·ч
$\text{LiC}_6\ \text{LiFePO}_4$	18	18	65	0,039	3,1	79	186	1,00
$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}\ \text{LiNMC}$	115	20	102	0,520	45,8	88	1500	0,55
$\text{LiC}_6\ \text{LiNMC}$	18	18	65	0,047	12,09	257	137	0,19

троды, полимерные сепараторы с жидким электролитом). Полученная экспериментально теплоемкость аккумуляторов А123 типоразмера 18650 составила 1409 Дж/(кг·К).

Для определения фактических характеристик аккумуляторов различных типов при низких температурах были испытаны образцы аккумуляторов с использованием климатической камеры КХТ 450 М (ООО «Завод испытательного оборудования «Патриот») и химических анализаторов тока АСК150.24.1750.1 и АСК2.5.10.8 (ООО «Яростанмаш»). Перечень испытанных аккумуляторов с указанием некоторых ключевых характеристик приведен в табл. 1. Емкость в нормальных климатических условиях (НКУ) определена при регистрации разрядной кривой третьего цикла заряда-разряда аккумулятора током 0,1С при комнатной температуре (С — сила тока заряда или разряда в относительных единицах, определяемых как отношение фактической силы тока в амперах при испытаниях к емкости данного аккумулятора в ампер-часах).

Остаточная емкость аккумуляторов, полностью заряженных при комнатной температуре, определялась при разряде различными токами после суточной выдержки в климатической камере при заданной температуре (в диапазоне 0...–40°C). Результаты, полученные при силе тока 0,1С, в относительных единицах емкости аккумулятора представлены в табл. 2 и на рис. 5. Диапазон рабочих напря-

Таблица 2. Остаточная емкость, % номинальной емкости (ток разряда — 0,1С)

Наименование	Температура, °С				
	–40	–30	–20	–10	0
$\text{LiC}_6\ \text{LiFePO}_4$	0,0	0,1	0,2	81,0	85,0
$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}\ \text{LiNMC}$	66,7	77,1	82,2	85,7	90,0
$\text{LiC}_6\ \text{LiNMC}$	0,0	0,0	0,0	85,9	89,0

жений при циклировании, а также при отдельных зарядах и разрядах выбран следующим образом:

2,8—3,65 В для  $\text{LiC}_6\|\text{LiFePO}_4$ ;

2,8—4,2 В для  $\text{LiC}_6\|\text{LiNMC}$ .

Видно, что даже при достаточно щадящем режиме разряда (токи 0,1С) стандартные аккумуляторы типоразмера 18650 оказываются полностью неработоспособными уже при температуре –20°C. На основе данных табл. 2 были построены аппроксимационные зависимости доступной емкости аккумуляторов различных типов от температуры для дальнейшего использования в расчетах энергетического баланса портативного источника питания.

Портативный источник питания был также испытан на разряд максимальной и номинальной мощностью в экстремальных климатических условиях. Полный заряд аккумуляторной батареи источника осуществлялся при нормальных климатических условиях от стабилизированного лабораторного источника питания Gophert CPS 6017. Разряд проводился с помощью анализатора химических источников тока АСК150.24.1750.1. Для имитации разряда в условиях низких температур источник питания с полностью заряженной аккумуляторной батареей помещался в климатическую камеру КХТ 450 М и выдерживался при –40°C около двух суток. За это время температура аккумуляторной батареи сравнивалась с температурой в камере, что контролировалось средствами встроенного программного обеспечения (ПО) контроллера заряда. Далее с помощью анализатора химических источников тока АСК150.24.1750.1 проводился разряд источника номинальной мощностью 100 Вт. При этом на вход устройства подавалось питание от стабилизированного лабораторного источника (33,1 В при 5,7 А), который выступил в силу ограничений климаткамеры в качестве имитатора солнечной батареи. В связи с заданными встроенным ПО запретами на заряд аккумуляторов при температурах ниже 0°C в таких условиях заряд аккумуляторной батареи не начался, и вся энергия использовалась нагревателем аккумуляторной батареи. Прогрев аккумуляторной батареи до температуры 5°C, при которой разрешен заряд аккумуля-

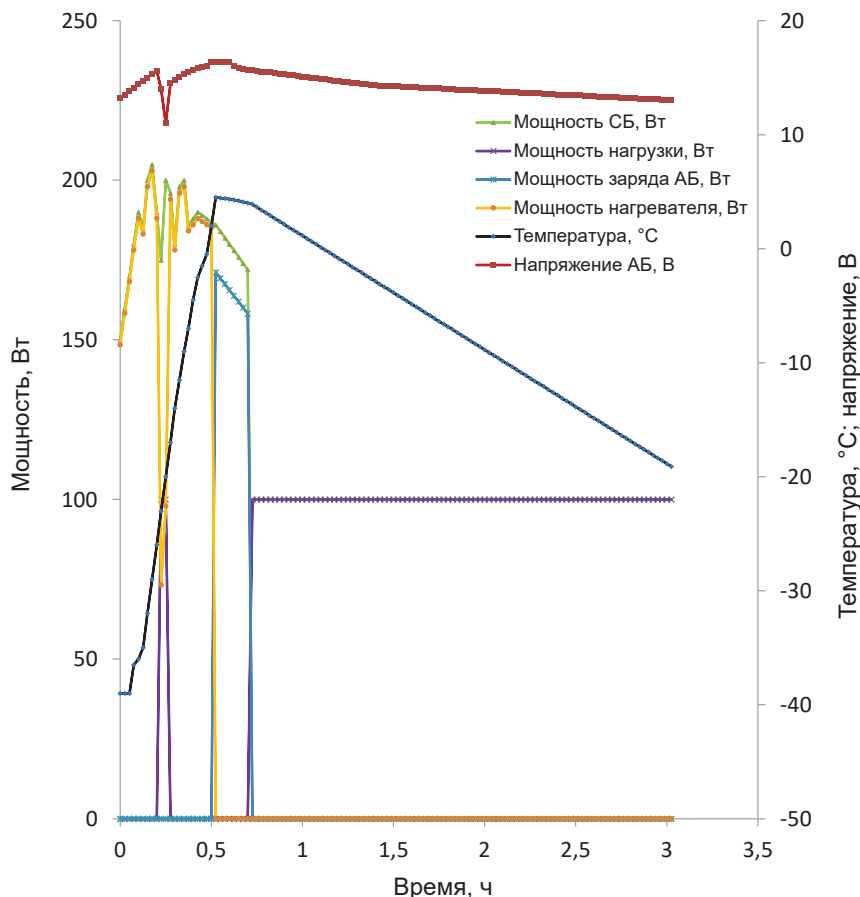


Рис. 3. Динамика изменения мощности и напряжения на элементах портативного источника питания во время испытаний при  $-40^{\circ}\text{C}$  (СБ – солнечная батарея, АБ – аккумуляторная батарея)  
 Fig. 3. Dynamics of changes in power and voltage on the elements of a portable power supply during testing at  $-40^{\circ}\text{C}$  (СБ – solar battery, АБ – rechargeable battery)

Новые технологии освоения Арктики

торов с графитовым анодом, произошел за 40 мин (температура в климаткамере оставалась на уровне  $-40 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ), при этом на нагрев было затрачено около 120 Вт·ч энергии. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.

С учетом результатов климатических испытаний аккумуляторов данного типа разряд источника питания на нагрузку был начат при достижении температуры аккумуляторной батареи  $6,3^{\circ}\text{C}$ . При этом был отключен имитатор солнечной батареи (т. е. заряд портативного источника питания от солнечной батареи не проводился), и изделие в таких условиях проработало на номинальной мощности 2,3 ч. Таким образом, была протестирована работа источника питания не только при низких температурах, но и при неблагоприятных условиях по солнечной радиации.

**Расчетно-аналитические исследования для оценки выработки энергии источником питания в различных климатических условиях разных регионов России.** Для определения эффективности применения разрабатываемого источника питания в широком диапазоне значений температуры и инсоляции, характерных для разных регионов, был разработан алгоритм расчета энергетического ба-

ланса портативного фотоэлектрического источника питания. Цель расчета — оценка выработки (производительности) автономного фотоэлектрического портативного источника питания. В основе алгоритма лежит почасовой расчет средствами MS Excel энергетического баланса установки с использованием климатических данных (инсоляции, температуры), данных по нагрузке потребителя и технических параметров компонентов установки.

Первым этапом расчета была подготовка исходных данных о солнечной радиации и температуре. В качестве входных климатических данных использовались средние суточные температуры и суточные величины суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, из глобальной климатической базы NASA POWER [14] за 2017—2018 гг. Пересчет суточных сумм солнечной радиации на произвольный угол наклона фотоэлектрических модулей осуществлялся с использованием подхода, описанного в [15] посредством оригинальной программы KM-2016v.2.1. В результате пересчета для конкретной географической точки формируется годовая последовательность часовых значений температуры и часовых

**Таблица 3. Оценка выработки и степени покрытия нагрузки для различных мест расположения установки**

Расположение места установки	Степень гарантированности электропитания	Годовая выработка, кВт·ч	$\Delta\psi$
Республика Саха (Якутия), поселок Мирный	23,3	122	0,07
Архангельск	20,2	106	0,02
Благовещенск	45,1	237	0,02
Приморье, район города Находка	40,0	210	0,01
Башкортостан, район города Уфа	21,6	114	0,04
Республика Калмыкия, район города Элиста	42,0	219	0,01
Республика Дагестан, район поселка Южносухокумск	35,5	187	0

сумм суммарной солнечной радиации, приходящей на наклонную поверхность с заданным углом. На основе полученных данных рассчитывалась рабочая температура фотоэлектрических преобразователей в составе модуля.

Алгоритм расчета соответствует алгоритму работы контроллера, который при наличии солнечной радиации осуществляет питание нагрузки и заряд аккумуляторной батареи. При температуре аккумуляторной батареи ниже заданной установки проводится ее предварительный подогрев. При отсутствии солнечной радиации или ее недостаточном уровне питание потребителей идет от встроенной аккумуляторной батареи. Разряд батареи прекращается, как только одна из групп аккумуляторов в составе батареи достигает напряжения 2,8 В. В расчетах производительности источника питания учитывалась зависимость КПД контроллера заряда от входной мощности.

Поскольку в алгоритм был заложено в качестве приоритета распределения энергии от солнечной батареи питание нагрузки, то на каждом шаге расчета во времени определялась разность потенциальной выработки солнечной батареи и величины нагрузки. Если она отрицательна, вся выработанная солнечной батареей энергия считается поглощенной нагрузкой. Если разница оказывается положительной, проверяется возможность ее поглощения аккумуляторной батареей. Поскольку для безопасного заряда аккумуляторной батареи необходим ее нагрев, нагрев в устройстве может осуществляться только от солнечной батареи, и полученные значения требуемой энергии для нагрева сравниваются на каждом шаге расчета с энергией, доступной в данный час от солнечной батареи.

Таким образом, энергобаланс портативного источника питания за каждый час складывается из энергии, выработанной солнечной батареей, энергии на нагрев аккумулятора, потерь энергии на теп-

лообмен с окружающей средой и энергии, пошедшей в нагрузку и аккумулятор от солнечной батареи. Последняя часть энергии равна разности выработки солнечной батареи и энергии на поддержание заданного диапазона температуры для оптимальной работы аккумуляторной батареи.

После расчета энергии в аккумуляторе к концу часа выполняется проверка покрытия нагрузки за данный час. Количество часов покрытия нагрузки определяет степень гарантированности за расчетный период.

### Результаты и обсуждение

Для определения производительности источника питания были проведены расчеты энергетического баланса при постоянной нагрузке мощностью 60 Вт и выбранном для экспериментального образца источника питания аккумулятора —  $\text{LiC}_6\|\text{LiNMC}$  (природный графит), номинальная энергоемкость аккумуляторной батареи 1,2 кВт·ч, мощность 240 Вт.

Расчеты степени гарантированности покрытия нагрузки выполнялись для ряда регионов вне зоны действия централизованной сети, в которых разрабатываемый источник может быть востребован. Это Башкирия и Дагестан с большим количеством пчеловодческих хозяйств, Калмыкия с отгонным животноводством, Приморье и Якутия, где действуют скотоводческие, фермерские хозяйства, артели косарей, охотников и рыболовов, а также Архангельская область как пример региона с низким уровнем инсоляции и среднегодовых температур. В ходе выполнения расчетов помимо региональных климатических условий в виде инсоляции и температуры варьировался тип аккумулятора в составе накопителя. При этом количество аккумуляторов в батарее подбиралось таким образом, чтобы доступная энергоемкость с учетом допустимой глубины разряда для всех типов рассматриваемых аккумуляторов составляла примерно 0,4 кВт·ч. Ре-

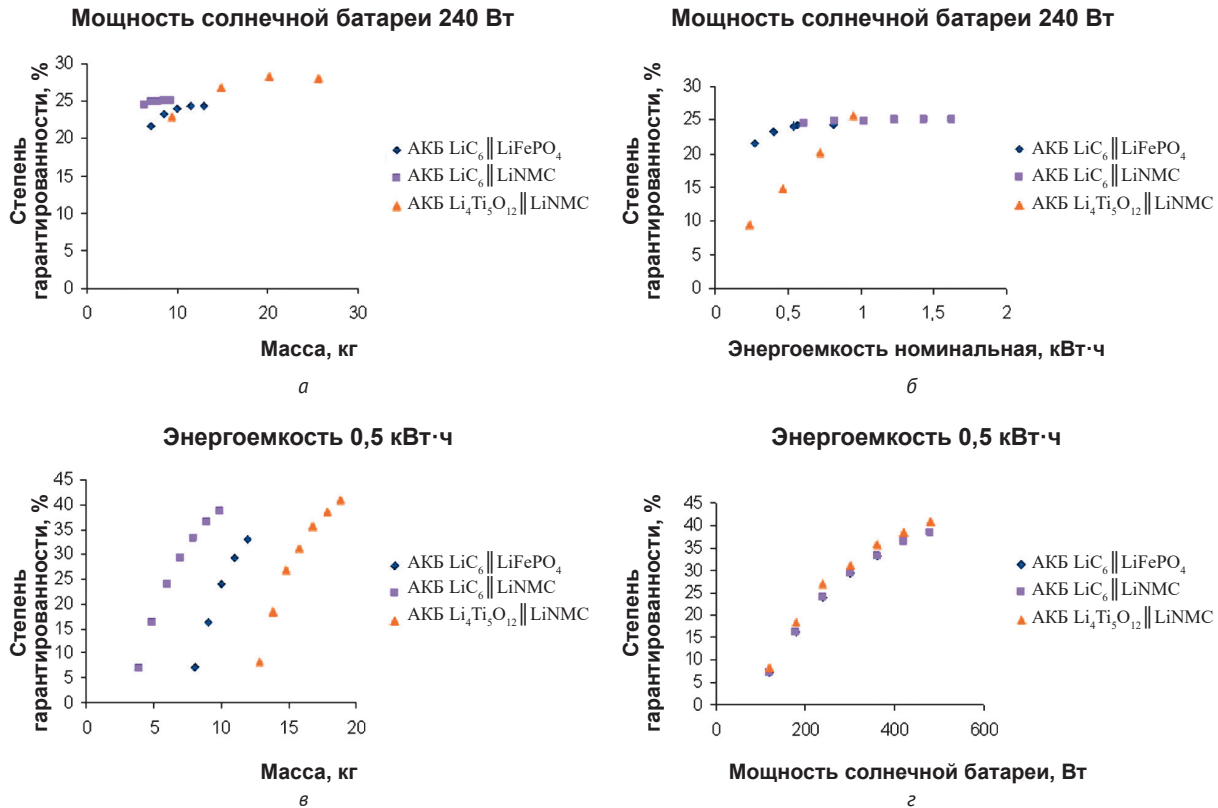


Рис. 4. Степень гарантированности покрытия нагрузки в зависимости от массы изделия (а) и энергоемкости аккумуляторной батареи (б) при фиксированной мощности солнечной батареи. Степень гарантированности покрытия нагрузки в зависимости от массы (в) и мощности солнечной батареи (г) при фиксированной энергоемкости

зультаты расчетов представлены в табл. 3. Были выполнены также оценки влияния температурной зависимости параметров аккумуляторной батареи на степень гарантированности покрытия нагрузки. Для этого рассчитывалась величина  $\Delta\psi = (\psi - \psi_0) / \psi_0$ , где  $\psi$  — степень гарантированности покрытия нагрузки с учетом температурной зависимости аккумуляторной батареи, а  $\psi_0$  — без учета этой зависимости.

Как показали результаты, учет температурной зависимости энергоемкости аккумуляторной батареи в наибольшей степени влияет на степень гарантированности электропитания и выработку установившегося в регионах с холодными зимами. Существенное снижение выработки и гарантированности в зимний период характерны для всех рассмотренных сценариев независимо от типа аккумулятора, поскольку в холодный период снижается интенсивность работы первичного источника энергии — солнечной батареи, что не позволяет не только подогреть аккумуляторы, но и заряжать их, а также передавать энергию в нагрузку. Оценки влияния мощности солнечной батареи и энергоемкости аккумуляторной батареи, а также типа используемых аккумуляторов на степень гарантированности покрытия нагруз-

ки для условий Республики Саха (Якутия) (поселок Мирный) представлены на рис. 4.

Видно, что вариация мощности солнечной батареи имеет существенно более серьезное влияние на степень гарантированности, так как увеличивает выработку энергии по всему расчетному периоду, а аккумуляторная батарея позволяет лишь использовать излишки выработки солнечной батареи для обеспечения электропитания потребителя в бессолнечные периоды. Использование аккумуляторов с отрицательным электродом на основе литированного нанотитаната существенно ухудшает массогабаритные характеристики источника питания, что, несмотря на выдающуюся морозостойкость, делает их малоприменимыми именно для работы в составе портативных систем.

### Выводы

Представлена схема разработанного авторами портативного автономного источника питания на основе солнечной фотоэлектрической системы. Для его эффективного использования в суровых климатических условиях, характерных в том числе для Арктической зоны Российской Федерации, предложен алгоритм работы контроллера заряда

в составе источника, предусматривающий первичный нагрев аккумуляторной батареи для повышения эффективности ее работы. Типы аккумуляторов в составе источника питания подобраны на основе климатических испытаний ряда зарубежных устройств. Показана перспективность использования для портативных применений высокоемких систем, несмотря на существенное падение фактической емкости при глубоком охлаждении аккумуляторной батареи, так как использование аккумуляторов с литированным нанотитанатным материалом анода существенно увеличивает массу изделия при сравнении с другими типами накопителей показателях гарантированности энергоснабжения потребителя.

Расчеты подтвердили целесообразность использования аккумуляторов на основе искусственного углеродного материала в качестве анода с катодом в виде смеси литированных оксидов переходных металлов; установлена целесообразность увеличения мощности солнечной батареи до 330 Вт.

Расчеты также показали следующее: разогрев аккумулятора не оказывает существенного влияния на показатели гарантированности, так как основную роль в энергобалансе играет доступная от солнечной батареи мощность, максимальная в теплое время года.

Портативный источник питания, использующий солнечную энергию, изготовлен при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор (соглашение) № 2872ГЦ1/45454 от 27 марта 2019 г.).

### Литература/References

1. Escalante Soberanis M. A., Fernandez A. M. A Review on the Technical Adaptations for Internal Combustion Engines to Operate with Gas/Hydrogen Mixtures. *Intern. J. of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, pp. 12134—12140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.070>.
2. Obydenkova S. V., Pearce J. M. Technical viability of mobile solar photovoltaic systems for indigenous nomadic communities in northern latitudes. *Renewable Energy*, 2016, no. 89, pp. 253—267. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.036>.
3. The HOMER Pro® microgrid software by HOMER Energy. Available at: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>.
4. Eroglu M., Dursun E., Sevencan S., Song J., Yazici S., Kilic O. A Mobile Renewable House Using Pv/Wind/Fuel Cell Hybrid Power System. *Intern. J. of Hydrogen Energy*, 2011, no. 36, pp. 7985 — 7992. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.046>.
5. Dalton G. J., Lockington D. A., Baldock T. E. Case Study Feasibility Analysis of Renewable Energy Supply Options for Small to Medium-Sized Tourist Accommodations. *Renewable Energy*, 2009, no. 34, pp. 1134—1144. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.018>.

6. Kang J., Jayaram S. H., Rawlins J., Wen J. Characterization of Thermal Behaviors of Electrochemical Double Layer Capacitors (EDLCs) with Aqueous and Organic Electrolytes. *Electrochimica Acta*, 2014, no. 144, pp. 200—210. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.07.158>.
7. Bi K., Zhao S.-X., Huang C., Nan C.-W. Improving Low-Temperature Performance of Spinel  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  Electrode and  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4/\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  Full-Cell by Coating Solid-State Electrolyte Li-Al-Ti-P-O. *J. of Power Sources*, 2018, vol. 389, pp. 240—248. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.03.071>.
8. Wang Y., Chu Z., Feng X., Han X., Lu L., Li J., Ouyang M. Overcharge Durability of  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  Based Lithium-Ion Batteries at Low Temperature. *J. of Energy Storage*, 2018, vol. 19, pp. 302—310. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.08.012>.
9. Попель О. С., Тарасенко А. Б. Гибридные накопители электрической энергии: их особенности и применение (обзор) // Теплоэнергетика. — 2018. — № 5. — С. 27—44. — DOI: 10.1134/S0040363618050090.
10. Popel O. S., Tarasenko A. B. Hybrid Electric Energy Storages: their Specific Features and Application (Review). *Thermal Engineering*, 2018, vol. 65, no. 5, pp. 266—281. DOI: 10.1134/S0040601518050099.
11. Веб-сайт группы компаний Хевел. — URL: <https://www.hevelsolar.com>.
12. Hevel Group of Companies website. Available at: <https://www.hevelsolar.com>.
13. EP SOLAR Charge Controller User Manual. Available at: <https://www.epsolarpv.com/upload/cert/file/1811/Tracer-AN-SMS-EL-V1.0.pdf>.
14. Li S., Ping A., Liu Y., Ma X., Li C. A Variable-Weather-Parameter MPPT Control Strategy Based on MPPT Constraint Conditions of PV System with Inverter. *Energy Conversion and Management*, 2019, October, vol. 197, no. 1, p. 111873. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.065>.
15. Попель О. С., Тарасенко А. Б., Титов В. Ф. Патент на полезную модель. Автономное светосигнальное устройство. RU (11) 142 175(13) U1. 20.06.2014. Бюл. № 1. — URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU142175U1\\_20140620](https://yandex.ru/patents/doc/RU142175U1_20140620).
16. Popel O. S., Tarasenko A. B., Titov V. F. Utility Model Patent. Autonomous light-signaling device. RU (11) 142 175(13) U1. 20.06.2014. Byul. no 1. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU142175U1\\_20140620](https://yandex.ru/patents/doc/RU142175U1_20140620). (In Russian).
17. NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources). Available at: <https://power.larc.nasa.gov/>.
18. Komarova N. A., Rafikova Yu. Y., Tarasenko A. B., Kiseleva S. V. Autonomous Power Supply Using Solar Energy in Russian Far East Regions. *MATEC Web of Conferences*, 2017, no. 112, p. 10011. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711210011>.



### Информация об авторах

*Алексей Борисович Тарасенко*, старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2), e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com.

*Ярослав Андреевич Меньшиков*, технический директор, ООО «Яростанмаш» (119435, Россия, Москва, Малый Саввинский пер., 5-29), e-mail: yarst@mail.ru.

*Муси Жамалуттинович Сулейманов*, кандидат технических наук, заместитель заведующего лабораторией возобновляемых источников энергии, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2), e-mail: smusi@mail.ru.

*Софья Валентиновна Киселева*, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: k\_sophia\_v@mail.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Тарасенко А. Б., Меньшиков Я. А., Сулейманов М. Ж., Киселева С. В. Мобильный фотоэлектрический источник питания для применения в условиях низких температур // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 134—143. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-134-143.

---

## PORTABLE PHOTOVOLTAIC POWER SUPPLY FOR LOW TEMPERATURE APPLICATIONS

Tarasenko A. B.

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Menshikov Ya. A.

LLC YAROSTANMASH (Moscow, Russian Federation)

Suleymanov M. Zh.

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Kiseleva S. V.

Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

The article was received on March 13, 2020

### Abstract

The paper describes autonomous power supply for small and mobile consumers such as reindeer farmers, tourists, geological groups, emergency teams and others, operating for a long time outside the centralized power supply networks and in tough environment conditions. The authors consider the development and operation issues of portable power supplies based on renewable energy power sources in extreme climatic conditions. The authors present the developed autonomous portable photovoltaic power supply, its operation algorithm and technical parameters. The power supply contains high-performance silicon photoelectric modules based on heterojunctions, a high-capacity lithium-ion battery with a built-in heater, and a charge controller with the function of extreme power control and balancing of the battery cells.

The controller's operating algorithm ensures that the battery is heated before charging at a temperature below zero to prevent the formation of dendrites on the anode electrodes of lithium-ion cells.

To provide power source operation in Arctic conditions several Li-ion batteries were tested using climate chamber and including charge-discharge cycling at temperatures from the room one down to minus 40°C. Based on the obtained experimental data the energy balance for different Russian regions was calculated and optimal type of batteries as part of a portable power supply was selected.

Using the NASA POWER climate database on daily amounts of total solar radiation and average air temperature (2017-2018), the authors created local hourly data arrays with a time step of 1 hour. Based on these data, the authors calculated the energy balance of a portable power supply for various places of its potential use, such as Yakutia, Arkhangelsk, Blagoveshchensk, Nakhodka, Elista and some others. Using the balance calculations the authors determined the influence of photovoltaic battery power and the capacity of the installed Li-ion batteries on the autonomous life of the portable power supply at the rated power of the consumer. The energy spent by battery heater proved to have no significant influence on the energy balance. The power of the photovoltaic

battery, which is maximum in the warm season, exerts the most influence on the operation of the power supply and the degree of load coverage.

High-capacity Li-ion batteries are supposed to be optimal for portable application, despite a sharp decrease in energy consumption at battery temperatures below zero, due to their much lower mass than lithium-nanotitanate-based batteries that are more resistant to freezing. They provide battery life close to those for lithium-nanotitanate batteries (in the case of using solar radiation for heating) with a significantly lower total mass of the power source.

**Keywords:** *portable power supply, photoelectric converter, lithium-ion battery, charge controller, extreme regulation, climate tests.*

The portable power supply using solar energy was developed with the financial support of the Federal State Budgetary Institution “Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (FASIE)”, Agreement No. 2872ГC1/45454 (27.03.2019).

---

### **Information about the authors**

**Tarasenko Alexey Borisovich**, Senior Researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (2 Bldg, 13, Izhorskaya, Moscow, Russia, 125412), e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com.

**Menshikov Yaroslav Andreevich**, Technical Director, LLC YAROSTANMASH (5-29, Lane Maly Savvinsky, Moscow, Russia, 119435), e-mail: yarst@mail.ru.

**Suleymanov Musi Zhamaluttinovich**, PhD of Engineering Science, Deputy Head of the Laboratory, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (2 Bldg, 13, Izhorskaya, Moscow, Russia, 125412), e-mail: smusi@mail.ru.

**Kiseleva Sofya Valentinovna**, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: k\_sophia\_v@mail.ru.

### **Bibliographic description of the article**

**Tarasenko A. B., Menshikov Ya. A., Suleymanov M. Zh., Kiseleva S. V.** Portable photovoltaic power supply for low temperature applications. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 2 (38), pp. 134—143. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-134-143. (In Russian).

© Tarasenko A. B., Menshikov Ya. A., Suleymanov M. Zh., Kiseleva S. V., 2020