

УСТРОЙСТВА И ИЗДЕЛИЯ  
НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 620.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ  
МИКРОРОБОТОВ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

© 2024 г. А. С. Дмитриев<sup>1,2,\*</sup>, А. А. Жуков<sup>3,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО “Институт графена”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

\*E-mail: asdmiriev@mail.ru

\*\*E-mail: and\_zhukov@mail.ru

Поступила в редакцию 17.12.2022 г.

После доработки 17.04.2023 г.

Принята к публикации 17.04.2023 г.

Проведен анализ систем эффективного энергообеспечения микророботов-инспекторов, предназначенных для осмотра и фиксации повреждений, иных особенностей технически сложных систем при замене человека для выполнения тяжелых и/или опасных работ. Анализ на основе современных методов оценок и расчета эффективности показал, что могут быть использованы различные способы энергетического питания микророботов, включая суперконденсаторы, батареи и другие. Наиболее эффективными оказываются системы на основе солнечного излучения с использованием либо термофотовольтаики, либо материалов с фазовыми переходами. Показано, что микророботы могут быть эффективно обеспечены энергией за счет теплового солнечного излучения с применением материалов на фазовых переходах на основе графеновых нанокмозитов. Графеновые композитные вставки могут играть роль тепловых ключей, обеспечивающих перемещение микророботов по поверхностям. Это открывает новые возможности для энергообеспечения кластеров (облаков) микророботов для различных применений.

DOI: 10.56304/S1992722323060067

## ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена анализу систем эффективного энергообеспечения дронов или микророботов-инспекторов (беспилотных летательных аппаратов (дроны) – БЛА, либо микророботов – МР), предназначенных для наружного осмотра и фиксации повреждений, иных особенностей технически сложных систем различного назначения в наземных или космических условиях при замене человека для выполнения тяжелых, утомительных и/или опасных работ. Решение поставленной проблемы составляет одну из важнейших задач надежности и безопасности промышленного оборудования, особенно в атомной и тепловой энергетике, на объектах трубопроводного и иного транспорта [1–9], а также для устойчивого функционирования систем космического базирования [3, 4]. Несмотря на имеющиеся в этом направлении исследования и разработки [10–15], практически везде для энергообеспечения указанных устройств используются системы либо электропитания в виде аккумуляторных батарей (например, литий-ионных), либо внутреннее преобразование

топлива в электрическую энергию (двигатели внутреннего сгорания, топливные элементы, включая водородные источники питания), химические или радиоизотопные источники энергии [15–17]. Вместе с тем для автономных систем указанного типа весьма эффективной представляется система, основанная на тепловом солнечном излучении (без использования фотоэлектрических модулей). Проведены анализ энергетической эффективности различных систем энергообеспечения и оценка использования термофотовольтаики и наноматериалов на фазовых переходах (ФП) с применением энергетических док-станций [9, 16].

До последнего времени отмеченной проблеме уделялось недостаточное внимание, хотя были сделаны различные предложения по системам энергообеспечения наземных и космических МР и дронов [10–15]. Существуют фактически четыре основных типа МР, связанные с типом среды, в которой они перемещаются – наземные или движущиеся по поверхности в атмосферной среде, подводные, летающие и космические [16–21]. Однако условия и особенности функционирования

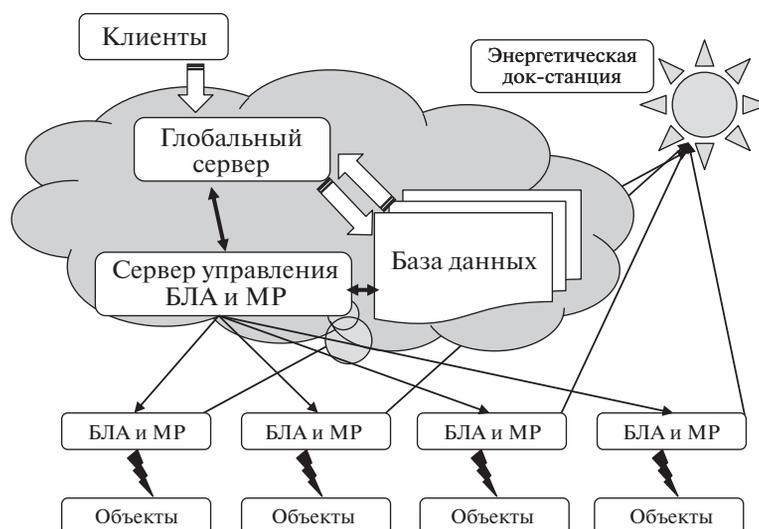


Рис. 1. Сетевая схема функционирования БЛА и микророботов для инспекции промышленных объектов.

ния МР для промышленной диагностики поставили новые нерешенные задачи для систем энергообеспечения.

Цель работы – обоснованный анализ эффективного энергообеспечения микророботов. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ инспекционных МР и их энергообеспечения;
- проанализировать системы генерации и хранения энергии для МР-инспекторов;
- оценить системы энергопитания на материалах с ФП;
- предложить термомеханическое движение МР с использованием графеновых тепловых ключей;
- провести общий анализ энергоэффективности для МР-инспекторов.

Для любой оптоэлектронной системы, постоянно находящейся в движении, энергетические источники представляют собой одну из самых сложных областей исследований и внедрения мобильной робототехники. Растущее внедрение дронов и автономных транспортных средств подпитывает развитие новых аккумуляторных технологий, безопасных и доступных по цене, с более длительным сроком службы, надежной устойчивостью к температуре, более высокой плотностью энергии. Особенно это касается систем мобильной инспекции на основе МР-инспекторов, независимо от того, находятся ли эти системы на земле, под водой, в атмосфере или космосе.

### ИНСПЕКЦИОННЫЕ МИКРОРОБОТЫ И ИХ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ

Сетевая схема функционирования БЛА и микророботов для инспекции, в частности, наземных

промышленных объектов показана на рис. 1. Все элементы схемы хорошо изучены, кроме системы энергообеспечения. Для роботов, размеры которых сопоставимы или превышают рост человека, и больших дронов такая задача решается наличием на борту робота энергетического источника (как правило, аккумуляторной батареи, топливного элемента или химического источника). Однако для МР и микродронов наличие батареи весьма большого веса может оказаться совершенно неприемлемым. В этом случае, очевидно, проще и удобнее иметь зарядную док-станцию, от которой будет подпитываться МР. Как показывает анализ, при наличии механизма перемещения в виде термоактюаторов [1–9] можно использовать док-станцию на базе тепловых аккумуляторов на ФП и как систему перемещения. Такой вариант рассматривается здесь впервые.

МР-инспектор представляет собой роботизированное микроустройство, имеющее размеры от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, содержащее в своей конструкции несущую платформу как систему передвижения к поверхности инспектируемого объекта, так и перемещения по этой поверхности. Помимо этого, МР имеет камеры визуального оптического и ИК-слежения, термоактюаторы, источник питания, микромодуль беспроводного приема и передачи данных, внешнюю антенну микромодуля беспроводного приема и передачи данных, микромодуль управления перемещением, микроблоки технического зрения, содержащие излучатели ИК-сигнала и приемники отраженного ИК-сигнала. Источник энергопитания – либо полностью автономен за счет систем хранения энергии непосредственно на устройстве, либо имеется блок выработки энергии, который с помощью,

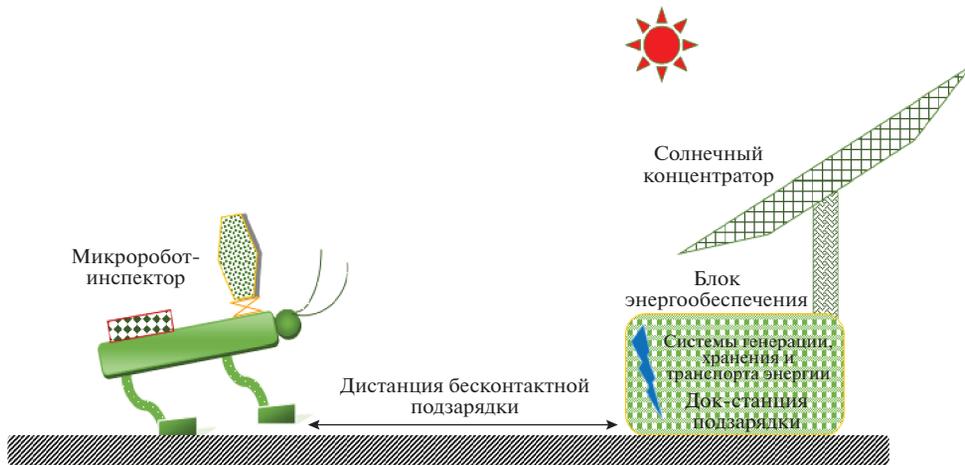


Рис. 2. Схема эффективного энергообеспечения микробота-инспектора.

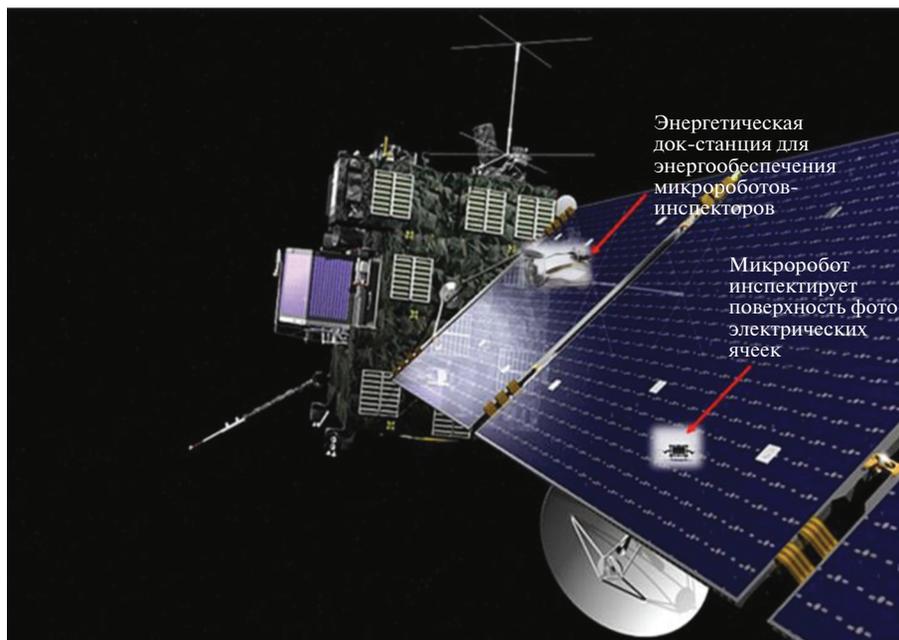


Рис. 3. Система энергообеспечения космического МР-инспектора с помощью энергетической док-станции на солнечном тепловом излучении.

например, бесконтактной зарядки и док-станции обеспечивает энергопитание МР (рис. 2). В наземных и космических условиях имеется источник энергии — солнечное излучение, которое можно использовать как источник генерации электрической энергии (фотовольтаика), так и источник тепловой энергии (тепловые аккумуляторы) или гибридной энергетики (электричество и тепло — термофотовольтаика и термоэлектрическое преобразование).

В случае применения МР-инспектора в условиях космоса (рис. 3) весьма удобно использовать в перечисленных способах генерации для подпитки МР энергетическую док-станцию, ко-

торая при снижении энергетической мощности МР ниже определенного уровня служит системой энергообеспечения.

Базовой идеей настоящей работы является использование планковского теплового солнечного излучения в качестве основного источника энергии. При этом для функционирования МР-инспектора полагается, что электрическая энергия преобразуется от теплового аккумулятора на базе материалов с ФП, которые испытывают ФП при нагреве солнечным излучением. Отметим, что энергия для перемещения самого МР также непосредственно берется от теплового аккумулятора

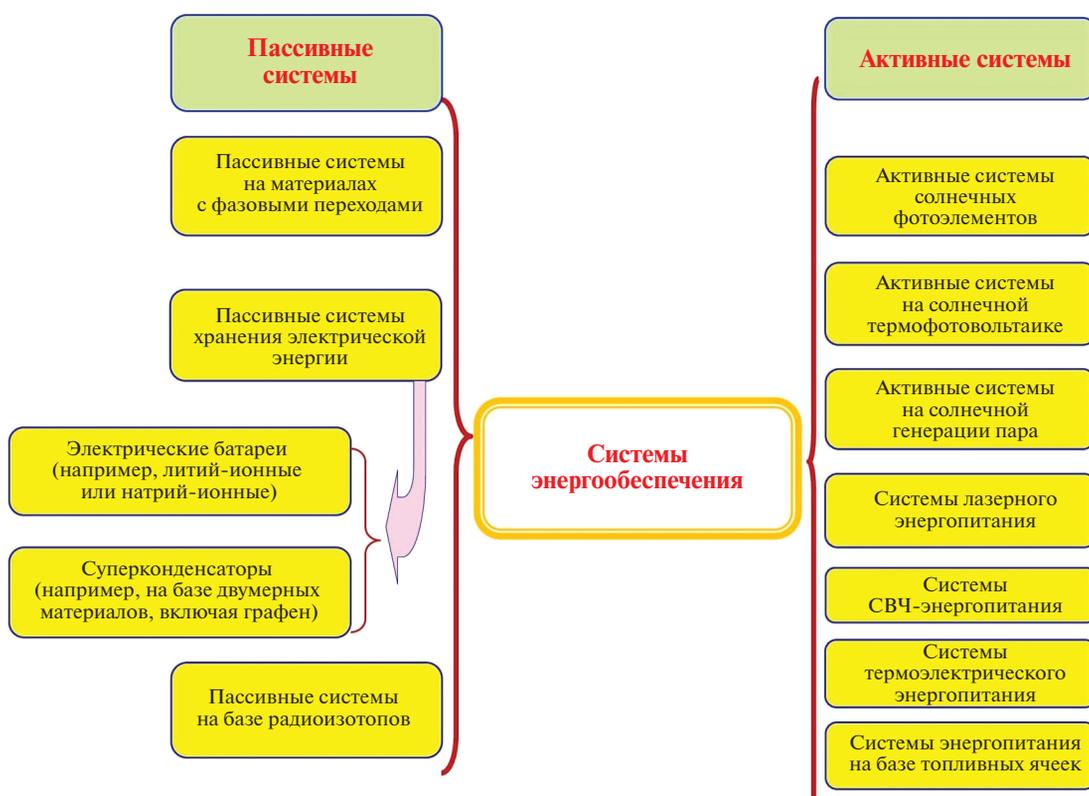


Рис. 4. Потенциальные системы энергообеспечения МР-инспекторов.

на базе материалов с ФП (рис. 2). В качестве подобных материалов предполагается использовать, например, нанокompозиты на основе графена и его гибридов [21–26].

Проведенные в настоящее время исследования показали, что такой вариант реализуем и достаточно перспективен [27]. Вместе с тем необходимо провести анализ эффективности различных систем энергообеспечения МР и сравнить их по ряду важнейших параметров: удельная мощность энергии, время зарядки и разрядки, общее время жизни и надежность подобных систем. Проведем такой анализ.

Принципиальная схема потенциальных систем эффективного энергообеспечения МР-инспектора показана на рис. 4. Эти системы можно разделить на пассивные и активные. Для пассивных систем энергия накапливается заранее (не в период работы робота-инспектора) и используется в процессе его работы, питая необходимые энергетические каналы (движение, телекоммуникации, видеосъемка, сенсоры и датчики и т.д.).

В активных системах генерация электроэнергии происходит как во время работы МР, так и в период его зарядки на док-станции.

#### АНАЛИЗ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ И ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МИКРОРОБОТОВ-ИНСПЕКТОРОВ

Проведен анализ пассивных и активных систем генерации энергии. Предполагалось, что энергоемкость (мощность) системы должна составлять не менее 3–5 Вт. Для пассивных систем проведены расчеты энергоэффективности систем с ФП (рабочие тела выбраны согласно методикам [15, 16], преобразователем является термоэлектрический генератор с разностью температур на горячем и холодном спае от 30 до 40°C, мощность 3–7 Вт), систем с литий-ионными батареями [18–20] и суперконденсаторами [20].

Предполагалось, что размер систем хранения тепловой и электрической энергии одинаков (для определенности выбран объем  $V = 1.25 \text{ см}^3$ ). Отметим, что наиболее эффективными являются суперконденсаторы не только из-за более длительного времени работы, но и по причине того, что для мощности более 3 Вт время работы снижается медленнее, чем у других систем энергоснабжения. Несмотря на то что у систем на материалах с ФП время работы ниже, чем у других систем, они могут выдержать существенно большее время разрядки и зарядки (количество ФП фактически

не ограничено). Такие системы могут быть как пассивными, так и активными, поскольку не требуют станции зарядки. Анализ систем энергопитания на материалах с ФП представлен отдельно.

В данном исследовании проведено сравнение эффективности различных систем генерации и хранения электрической энергии. Параметры этого сравнения, полученные по методикам [16–19], представлены на рис. 5. Укажем лишь некоторые модели расчета эффективности. Начнем с батарей и конденсаторов.

Кулоновский КПД (эффективность) можно определить как отношение заряда при разрядке батареи ( $q_p$ ) к общему заряду при зарядке ( $q_3$ ):

$$\eta_K = q_p/q_3.$$

Энергетическая эффективность (КПД) – отношение плотности энергии при разрядке ( $Q_p$ ) к плотности энергии при зарядке ( $Q_3$ ):

$$\eta_\Sigma = Q_p/Q_3.$$

Общий КПД определяется как

$$\eta_\Sigma = E_p/E_3,$$

где  $E_p$  и  $E_3$  – энергия после зарядки и разрядки соответственно. Заряд, разряд и общая энергоэффективность литий-ионных аккумуляторов (ЛИБ) связаны с количеством необратимого тепла, выделяемого в ЛИБ, и устанавливают карту энергоэффективности этих батарей. Эта карта состоит из нескольких кривых постоянной энергоэффективности, которая на графиках обычно представляет по оси абсцисс – емкость батареи, по оси ординат – заряд батареи, а также скорости заряда/разряда. Для энергоэффективности карты типичных семейств ЛИБ на основе графит/LiCoO<sub>2</sub>, графит/LiFePO<sub>4</sub> и графит/LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> хорошо известны и в данном исследовании используются как стандартные [18, 19]. Для типовых семейств ЛИБ их энергоэффективность исследуется с помощью сгенерированных карт режимов. С другой стороны, эффективность может быть рассчитана на основе энергетических критериев, например величин

$$\begin{aligned} E_{\text{вх}} &= \int_0^t V \cdot I_{\text{зар}} dt \\ Q_\Sigma &= \int_0^t \int_0^\delta Q_T(x,t) dx dt, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина ячейки ЛИБ, включающая в себя толщину анода, катода, коллектора тока, сепаратора на аноде и катоде,  $E_{\text{вх}}$  – входящая в батарею энергия во время зарядки (Дж/м<sup>2</sup>),  $V_{\text{зар}}$ ,  $I_{\text{зар}}$  – напряжение и ток зарядки,  $Q_\Sigma$  – удельная тепловая энергия (Дж/м<sup>2</sup>),  $Q_T$  – удельная генерация тепла в ячейке (Вт/м<sup>3</sup>).

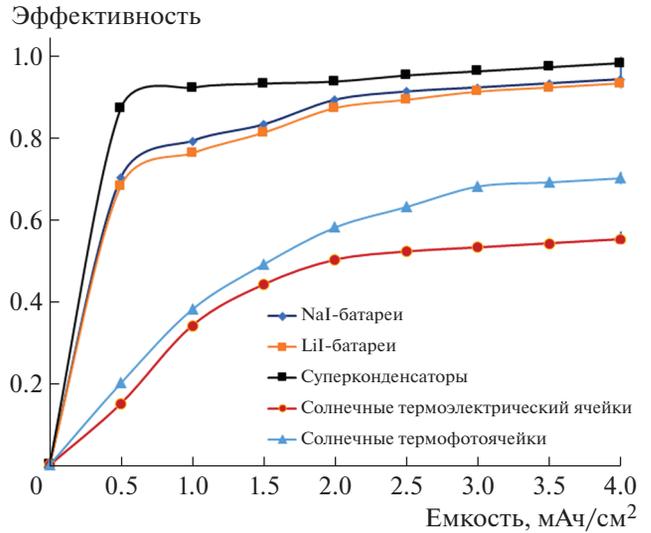


Рис. 5. Эффективность как функция электрической емкости.

Методика расчета указанных выше величин, использованная в данном исследовании, взята из [19, 21]. Аналогичным образом вычислена эффективность суперконденсаторов, где тепловые потери несколько меньше, чем у батарей:

$$\eta_\Sigma = \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}} \cdot \frac{E_{\text{вх}} - Q_{\text{T,зар}}}{E_{\text{вых}} + Q_{\text{T,раз}}} - \left[ 1 - \frac{Q_{\text{T,зар}}}{E_{\text{вх}}} \right] \cdot \left[ \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вых}} + Q_{\text{T,раз}}} \right] = \eta_{\text{зар}} \cdot \eta_{\text{раз}}. \quad (2)$$

Здесь  $E_{\text{вых}}$  и  $E_{\text{вх}}$  – соответственно энергия при разрядке и зарядке,  $Q_{\text{T,зар}}$  и  $Q_{\text{T,раз}}$  – тепловые потери при зарядке и разрядке соответственно. На основе стандартных данных (например, [18]) проведены расчеты эффективности (рис. 6).

Заметим, что эффективность при емкости более 0.5–1.0 мАч/см² всегда выше 80%, что вполне приемлемо для энергообеспечения МР.

Однако не все эти системы могут работать при низких температурах: литий-ионные батареи сильно снижают эффективность ниже 200–240 К – сильное снижение скорости движения ионов лития при их интеркаляции (в 3–4 раза!), поэтому их использование в холодных регионах возможно, только если собственного тепловыделения хватает, чтобы поддерживать режимы работы с температурой выше 200 К. Суперконденсаторы менее подвержены этому эффекту, но вопрос об их использовании в условиях низких температур практически не исследовался.

Получена эффективность солнечных термофотоэлектрических ячеек и солнечных термоэлектрических ячеек, методика расчета которых

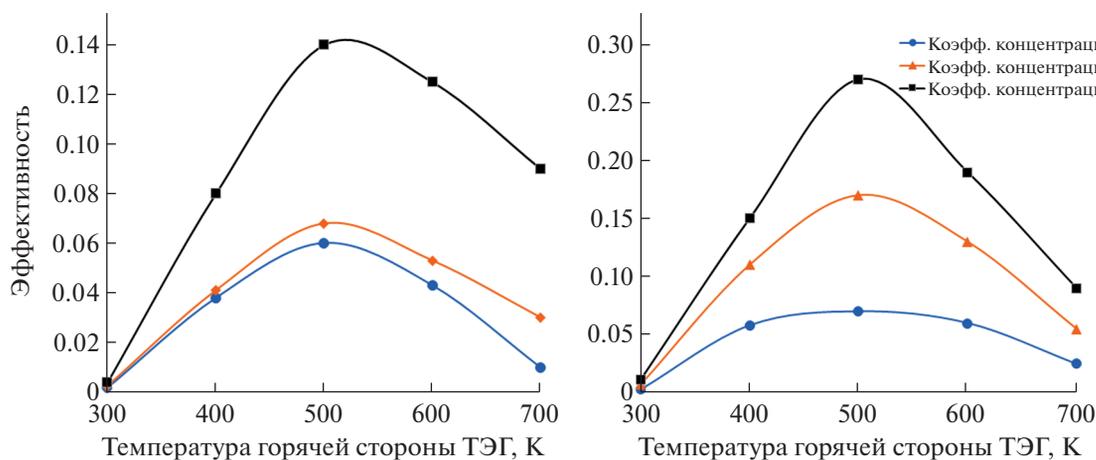


Рис. 6. Эффективность термоэлектрической солнечной генерации для различных величин добротности (а –  $ZT = 1$ , б –  $ZT = 2.5$ ) и концентрации солнечного излучения.

изложена ниже. Эффективность в этом случае можно записать как [22]:

$$\eta = \frac{(T_h - T_c)}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + (T_c/T_h)} \times \left\{ \tau_g \alpha_s \eta_{\text{opt}} - \frac{\varepsilon_e \sigma (T_h^4 - T_c^4)}{\eta_{\text{opt}} q_0} \right\} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{ТЭ}}}{q_0 A_s} \cdot \frac{P_{\text{ТЭ}}}{Q_{\text{ТЭ}}} \quad (4)$$

Здесь  $T_h$ ,  $T_c$  – температуры горячего и холодного спая термоэлектрического генератора,  $\bar{T} = (T_h + T_c)/2$ ,  $ZT$  – добротность термоэлектрического материала (принималась равной  $ZT = 1$  для объемного  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $ZT = 2.5$  – для  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -нанопроволок),  $\eta_{\text{opt}}$  – оптический коэффициент,  $\alpha_s$  – коэффициент поглощения абсорбера,  $\varepsilon_e$  – излучательная способность материала,  $\sigma$  – коэффициент Стефана–Больцмана. В качестве термоэлектрического материала выбран  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (объемный и в виде вертикальных нанопроволок на кремниевой подложке [22]). Использовали три варианта расчета – первый, при стандартном солнце (без концентратора, рис. 2), для которого принимался поток солнечного излучения, равный  $q_0 = 1.4 \text{ кВт/м}^2$ , а также с концентраторами и значениями  $q_1 = 2.8$  и  $q_2 = 7.0 \text{ кВт/м}^2$ .

#### АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭНЕРГОПИТАНИЯ НА МАТЕРИАЛАХ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Использование солнечного излучения (всего планковского спектра) для энергопитания МР-инспекторов позволяет решить большое количество проблем: сделать системы энергопитания

унифицированными, автономными и независимыми. Кроме того, использование в случае необходимости на самих МР или на тепловых аккумуляторных док-станциях концентраторов солнечного излучения позволяет расширить диапазон плотности используемой энергии и плотности мощности, обеспечив энергопотребление не для единичного МР, а их кластеров, что важно, если промышленные инспектируемые объекты достаточно велики по размерам и сложности мониторинга [9, 24–31].

Солнечные тепловые системы обычно состоят из двух частей: системы сбора солнечного излучения и системы хранения тепла. В системах сбора солнечного излучения устройства обычно представляют собой солнечные коллекторы (например, плоские коллекторы, параболические желобные коллекторы и коллектор-бабочка). Все эти коллекторы могут собирать солнечное излучение с черным поглощающим покрытием их поверхности. Системы хранения тепла содержат солнечные коллекторы или тепловые аккумуляторы. Для повышения эффективности использования солнечных тепловых систем можно применить солнечный коллектор прямого поглощения, где теплопередача связана с наличием специальной хорошо поглощающей излучение жидкости, непосредственно собирающей солнечный свет и преобразующей его в тепловую энергию [23]. Поскольку две процедуры объединены в один процесс, потери энергии ниже, чем у традиционных солнечных коллекторов. Теплоносители должны иметь большую теплоемкость и отличные фототермические характеристики. Однако обычные транспортные жидкости имеют внутренние недостатки, такие как плохое оптическое поглощение и низкая теплоемкость. Чтобы улучшить свойство оптического поглощения, многие исследователи используют наножидкости на водной или масляной основе. Наножидко-

сти в целом заметно улучшают теплопроводность, поглощающую способность и фототермические свойства после добавления наночастиц, таких как Ag, Ni, графит, графен и углеродные нанотрубки, в базовые жидкости. Среди этих наночастиц материалы на основе углерода обладают лучшими оптическими поглощающими свойствами и фототермическими характеристиками за счет резонансного плазмонного  $\pi$ -электронного состояния атомов углерода [23]. Наножидкости имеют гораздо лучшие фототермические характеристики, чем базовые жидкости, в то время как теплоемкость жидкости не может быть увеличена за счет добавление наночастиц. В последние годы были разработаны суспензии с ФП, модифицированные углеродными материалами в качестве теплоносителей для улучшения тепловой энергоемкости [21–23]. Суспензия с ФП имеет часть материалов с фазовым переходом (МФП, РСМ), причем энтальпия ФП позволяет значительно повысить теплоаккумулирующую способность теплоносителей в определенном температурном диапазоне. В солнечных коллекторах прямого поглощения суспензия с ФП со скрытой теплотой может обеспечить более высокую эффективность приемника, чем даже тепловая наножидкость. Однако материал с фазовым переходом обычно состоит из менее чем 20% МФП. Органические МФП состоят из парафина, жирной кислоты и жирного спирта, которые имеют большую энтальпию ФП; органические МФП с углеродными материалами могут поглощать и передавать солнечную энергию и выделяют тепловую энергию, которую можно определить как нагрев в процесс тепловой зарядки и разрядки. В процессе фототермической зарядки пусковой энергией является солнечная энергия, поэтому МФП с углеродными материалами могут напрямую поглощать и переводить солнечную энергию в тепловую. Для фототермоэлементов на основе МФП теплоаккумулирующая способность и скорость заряда тепловой энергии МФП являются ключевыми.

В настоящее время значительные результаты достигнуты в МФП, изготовленных на базе нанохлопьев графена (GNF), диспергированных, например, в парафине, с улучшенным оптическим поглощением и быстрой фототермической зарядкой. Влияние массовой доли GNF на теплопроводность, оптическое поглощение и фототермические характеристики получены в широком диапазоне температур [23]. Кроме того, теплоаккумулирующая способность МФП на основе фототепловых ячеек и скорости зарядки, их тепловая накопительная способность оцениваются как близкие с водой при значительно более высокой теплопроводности (рис. 7). Хорошо видно, что с добавлением даже малой массовой доли GNF теплопроводность заметно растет, что позволяет обеспечить более эффективный теплообмен между

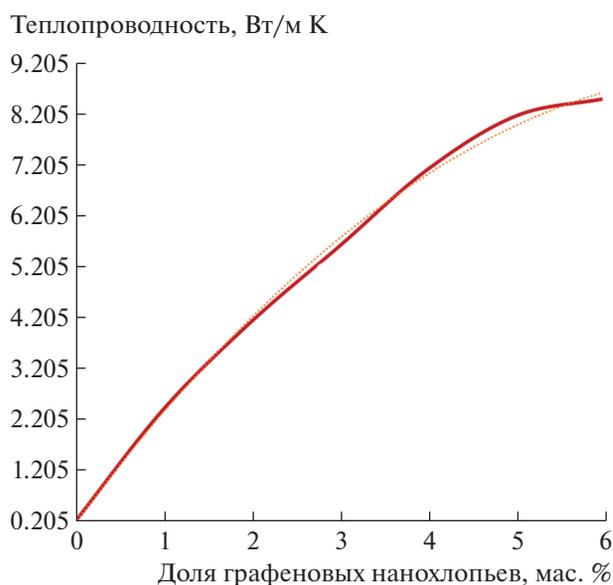


Рис. 7. Зависимость теплопроводности МФП от массовой доли графеновых нанохлопьев.

тепловым аккумулятором и приемным устройством МР. Результаты показывают, что фототермоэлементы на основе МФП с графеновыми нанохлопьями обладают большой производительностью и являются многообещающими в системах энергообеспечения МР-инспекторов.

В табл. 1 представлены величины энтальпии ФП для парафина и МФП на основе парафина с GNF.

Температура ФП составляет  $\sim 70^\circ\text{C}$ . Теплоемкость МФП (GNF)  $\sim 1.65$  Дж/г·К (до и после ФП). Вблизи точки ФП теплоемкость составляет величину от 28 до 37 Дж/г·К (в зависимости от доли GNF), в то время как теплоемкость чистой воды  $\sim 4.18$  Дж/г·К.

Расчеты показали, что время нагрева парафина объемом  $\sim 1$  см<sup>3</sup> излучением плотностью мощности 1 кВт/м<sup>2</sup> (одно солнце, площадь поглощения 1 см<sup>2</sup>, коэффициент поглощения 0.97) составляет  $t \sim 3500$  с от температуры 25 до  $60^\circ\text{C}$ . Нагрев от температуры  $60^\circ\text{C}$  до температуры ФП  $T_m \sim 70^\circ\text{C}$  составляет чуть более 7600 с. При добавлении GNF (0.5 мас. %) нагрев от температуры 25 до  $60^\circ\text{C}$  составляет 710 с, а нагрев от температуры  $60^\circ\text{C}$  до температуры ФП  $T_m \sim 70^\circ\text{C}$  — чуть более 760 с. Таким образом, добавление GNF в парафин может в значительной степени улучшить фототермические характеристики МФП. GNF является отличным материалом, поглощающим солнечные фотоны на основе резонанса  $\pi$ -электронов.

Таблица 1. Энтальпия фазового перехода

МФП	Энтальпия фазового перехода, Дж/г	
	плавление	кристаллизация
Парафин	199.7	203.5
Парафин +0.5% GNF	199.1	202.8
Парафин + 1% GNF	198.5	202.2
Парафин + 1.5% GNF	197.9	201.5
Парафин + 2% GNF	197.3	201.1
Парафин + 2% GNF+SiC (NP)	196.3	200.4

Тепловая емкость графенового МФП может быть вычислена из соотношения

$$Q_T = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(\phi) dT, \quad (5)$$

где  $Q_T$  – емкость хранения теплоты в МФП,  $m$  – масса МФП,  $T_1, T_2$  – начальная и конечная температуры при нагреве и ФП;  $C_p = C_p(\phi)$ ,  $\phi$  – доля графеновых хлопьев в МФП.

В качестве примера проведено сравнение МФП по эффективности с графеновыми наножидкостями на основе базовой жидкости (вода) и чистой воды (рис. 8).

Теоретическая тепловая теплоемкость МФП составляет ~600 Дж в диапазоне 30–75°C, а теплоаккумулирующая способность  $H_2O$  ~418 Дж (для наножидкостей на базе воды данные приведены на рис. 8). Теплоаккумулирующая способность МФП составляет величину, большую, чем  $H_2O$ , поскольку МФП имеют большой диапазон энтальпий ФП в области температур 60–70°C. Мож-

но вычислить эффективную тепловую емкость для различных материалов (в диапазоне температур, включая полную область ФП):

$$Q_{\text{eff}} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT,$$

где  $T_1 = 60, T_2 = 80$ .

Тепловая емкость различных материалов представлена на рис. 8. Хорошо видно, что МФП с графеновыми добавками весьма эффективны для накопления тепловой энергии за счет солнечного излучения. Отметим, что если бы накопитель был электрическим (накопления электрической энергии в литий-ионных батареях или суперконденсаторах), то время зарядки и разрядки было бы на 1–2 порядка больше, что совершенно недопустимо для МР-инспекторов, особенно использующихся в сложных условиях мониторинга опасных промышленных производств.

Расчеты сравнительной эффективности различных систем энергообеспечения представлены на рис. 9.



Рис. 8. Тепловая эффективность тепловых аккумуляторов с парафином и графеновыми добавками.

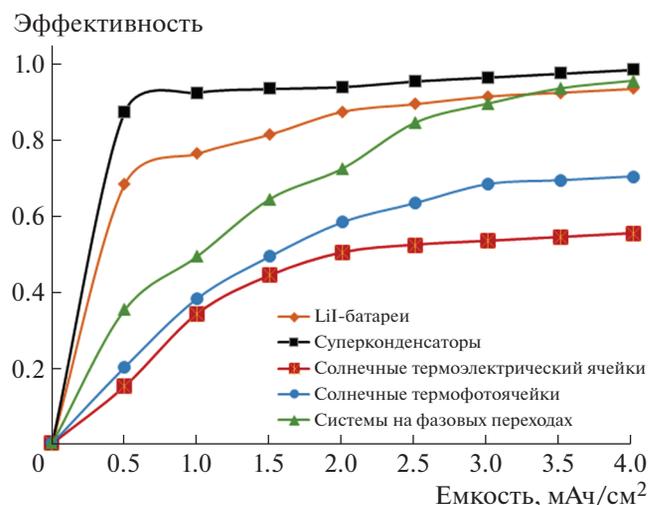
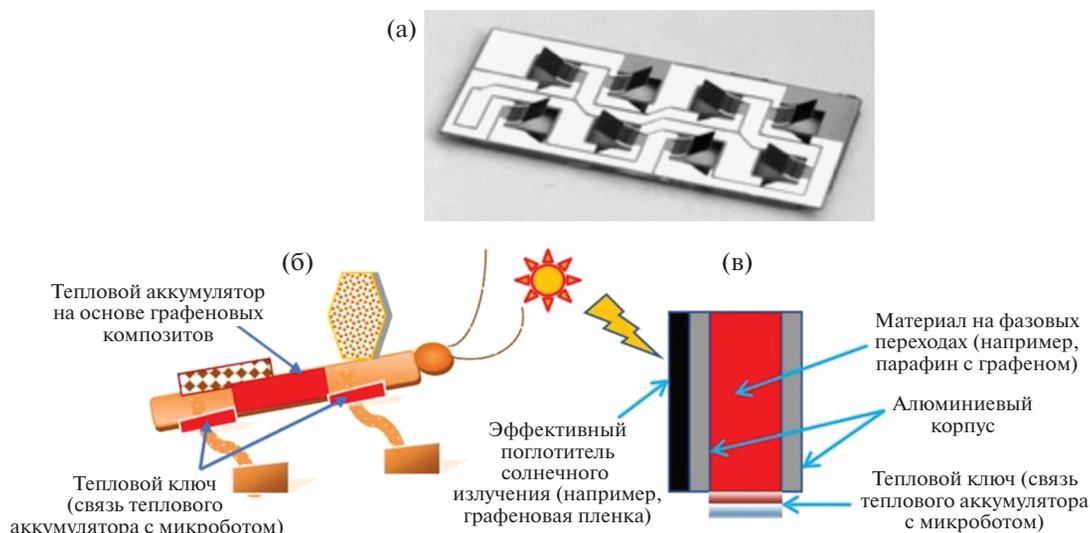


Рис. 9. Эффективность различных систем энергообеспечения, включая тепловые аккумуляторы на фазовых переходах.



**Рис. 10.** Прототип шагающей платформы (а) [37], микроробот (б) и энергетическая док-станция (в) с МФП с тепловыми графеновыми ключами.

Для систем тепловой аккумуляции на МФП емкость перечислена на основе стандартного коэффициента преобразования тепловой энергии в электрическую ( $\sim 0.35\%$ ). Из приведенных данных хорошо видно, что система тепловой аккумуляции солнечного планковского излучения на ФП практически не уступает никаким другим системам энергообеспечения, особенно при достаточно больших электрических емкостях. Оценки сравнения гибридной системы энергообеспечения (системы на ФП плюс термоэлектрическое преобразование) дают практически двойную эффективность по сравнению с литий-ионными батареями (эти исследования будут опубликованы отдельно). Этот результат достаточно неожиданный, поскольку до сих пор утверждалось, что электрические накопители всегда более эффективны, чем любые тепловые [29–31].

### ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ МИКРОРОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФЕНОВЫХ ТЕПЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ

Поскольку механизм движения МР может иметь в основе принцип действия биморфных термоактюаторов на основе системы “кремний–полиимид” [3–9], использование в качестве источника энергии теплового графенового аккумулятора на ФП позволяет непосредственно переводить тепловую энергию в движение. Действительно, механизм передвижения МР с использованием термоактюаторов связан с нагревом и охлаждением биморфных микропластин с наноконпонентами, играющими роль своеобразных “ножек” с сухим трением [3–6] (рис. 10).

При этом вместо подачи электрического сигнала на резистор, как описано в [3–5, 37], здесь предлагается использовать тепловой аккумулятор на основе композита “графен–полимер”, который посредством теплового ключа (выполненного также на базе графенового композита) может переключать режимы. Для этого необходимо иметь тепловые ключи, которые позволяли бы на короткое время теплоизолировать актюатор от теплового источника и, наоборот, быстро его включать. Последовательный нагрев и охлаждение “ножек” на основе термоактюаторов приводят к перемещению шагающей платформы [37], рис. 10.

### ОБЩИЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ МИКРОРОБОТОВ-ИНСПЕКТОРОВ

Вычисление эффективности позволяет дать прогноз важной характеристике – времени работы МР-инспектора для различных систем энергообеспечения – как функции потребляемой мощности (рис. 11).

Нетрудно видеть, что наиболее эффективной является система с использованием МФП, которая позволяет хранить тепловую энергию (за счет скрытой теплоты), конвертируя ее в случае необходимости в электрическую, например, с помощью термоэлектрического генератора. Однако такая система требует значительных конструктивных усилий, чтобы не было оттоков тепла в космическом пространстве. Пока такая система представляется слабо реализуемой, если не будут найдены другие решения (например, термостабилизация ячейки с таким материалом).

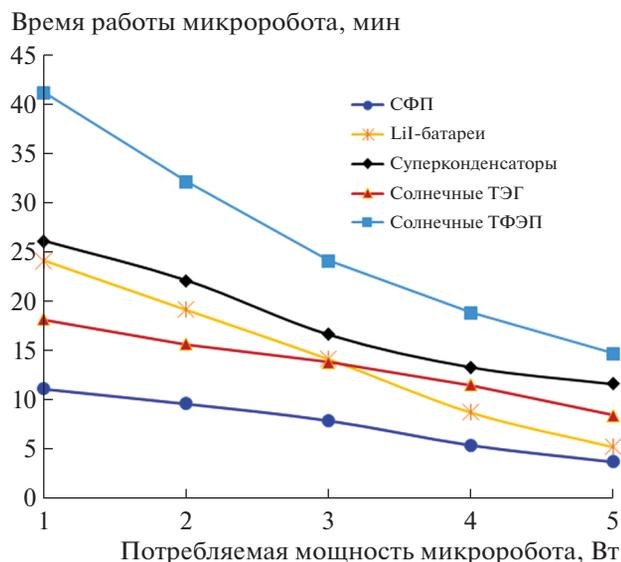


Рис. 11. Время работы микроробота как функция потребляемой мощности.

Расчеты показывают, что возможно использование и суперконденсаторов, например, на графене, которые подзаряжаются на док-станции. Однако такие конструкции проработаны пока недостаточно, поэтому окончательный выбор также сделать трудно. Что касается литий-ионных батарей, то здесь есть серьезные трудности, связанные с низкой температурой окружающей среды, что ведет к чрезвычайно большим временам зарядки (низкая скорость инкальтивирования ионов лития). Возможен предварительный анализ систем лазерной или СВЧ-передачи энергии, но сравнительный анализ для таких систем пока затруднен из-за отсутствия проработанных моделей [32–36].

Отметим, что для подводного, в частности глубоководного, мониторинга требуются особо компактные, стабильные источники энергии с высокой плотностью энергии для поддержки роботов-инспекторов, работающих в сложных и экстремальных условиях. Вероятно, в этом случае могут быть весьма эффективны тепловые аккумуляторы на ФП с гибридным преобразованием солнечного излучения и термоэлектрическим преобразованием.

Растущее внедрение дронов и автономных транспортных средств подпитывает развитие новых аккумуляторных технологий, безопасных и доступных по цене, с более длительным сроком службы, надежностью и устойчивостью к температуре, с более высокой плотностью энергии и относительно небольшим весом. Такими системами могут стать облака (кластеры МР-инспекторов с эффективным энергообеспечением за счет солнечного планковского излучения).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведен анализ эффективного энергообеспечения МР-инспекторов для мониторинга промышленных объектов.

Предложены альтернативные способы создания энергетических систем для МР – либо пассивных, либо активных.

Проведены расчеты эффективности различных энергетических систем. Показано, что наиболее эффективной является система с использованием материалов на фазовых переходах, позволяющая хранить тепловую энергию (за счет скрытой теплоты), преобразуя ее в случае необходимости в электрическую, например, с помощью термоэлектрического генератора. Однако такая система требует значительных конструктивных усилий, чтобы не было оттоков тепла в окружающую среду.

Удачным выбором может быть использование суперконденсаторов, например, на графене, которые подзаряжаются на док-станции. Однако такие конструкции проработаны пока незначительно, поэтому окончательный выбор сделать трудно. Что касается литий-ионных батарей, то здесь есть серьезные трудности, связанные с низкой температурой окружающей среды, что ведет к чрезвычайно большим временам зарядки (низкая скорость инкальтивирования ионов лития).

Наиболее интересными вариантами систем энергообеспечения, помимо тепловых аккумуляторов на ФП, являются солнечные термоэлектрические генераторы и термофотовольтаические ячейки. Несмотря на существенно более низкие КПД таких систем, они весьма надежны, работают при самых низких температурах, позволяют весьма гибко конструировать дизайн системы генерации и хранения электроэнергии.

Исследования в этом направлении необходимо активно развивать, что даст новый импульс и другим системам наземного, подводного, атмосферного и космического базирования.

Авторы выражают благодарность за полезные обсуждения некоторых аспектов новых систем энергообеспечения и графеновых материалов члену-корреспонденту РАН Е.В. Аметистову и академику РАН А.В. Клименко.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00840).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Градецкий В.Г., Князьков М.М., Фомин Л.Ф., Чащухин В.Г. Механика миниатюрных роботов. М.: Наука, 2010. 520 с.
2. Microbiorobotics (Second edition). Biologically Inspired Microscale Robotic Systems. Micro and Nano Technologies. Elsevier Inc., 2017.

3. Zhukov A., Bolotnik N., Chashukhin V. A walking robot with thermomechanical actuators for the inspection of photo–electric cells of solar arrays for spacecraft. *Clawar 2020: 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Moscow, Russian Federation, 24–26 August 2020.
4. Болотник Н.Н., Градецкий В.Г., Жуков А.А. и др. // Космические исследования. 2019. Т. 57. № 2. С. 132.
5. Васильев Ф.В., Жуков А.А., Коробков М.А. // Сб. тезисов 32 Междунар. науч.-техн. конф. “Экстремальная робототехника”. Санкт-Петербург: ООО “РА ФОРТУНА”, 2021. С. 41.
6. Горячева И.Г., Болотник Н.Н., Жуков А.А. и др. // Шагающий инсектоморфный мобильный микроробот. Патент РФ № 2699209. 2018.
7. Черноусько Ф.Л., Смирнов И.П., Козлов Д.В. и др. // Мобильный микроробот. Бюл. № 25. Полезная модель к патенту 154 708 (Россия). 2015.
8. Смирнов И.П., Козлов Д.В., Жуков А.А. и др. // Микросистемный космический робот-инспектор (варианты). Патент РФ 2 566 454. 2015.
9. Дмитриев А.С., Жуков А.А., Никитин А.А. // Сб. тезисов 33 Межд. Научно-техн. конф. “Экстремальная робототехника”, 29–30 сентября 2022, Санкт-Петербург. С. 328.
10. Bhushan P., Tomlin C. // An Insect-scale Untethered Laser-powered Jumping Microrobot. arXiv:1908.03282v1. 2019. DOI: arXiv:1908.03282v1
11. Nugent T., Kare J. // Proc. SPIE 8045. 2011. P. 514. <https://doi.org/10.1117/12.886169>
12. Ozaki T., Ohta N., Jimbo T., Hamaguchi K. // Nature Electronics. 2021. V. 4. P. 845. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00669-8>
13. Helbling E., Wood R. // ASME. Appl. Mech. Rev. 2018. V. 70. P. 010801. <https://doi.org/10.1115/1.4038795>
14. Le A., Truong L., Quyen T. et al. // EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems. 2020. V. 7 (22). P. 5. <https://doi.org/10.4108/eai.31-1-2020.162831>
15. Yan Y., Shi W., Zhang X. // EURASIP J. Wireless Commun. Networking. 2020. P. 67. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01679-4>
16. Datas A., Chubb D., Veeraragavan A. // Solar Energy. 2013. V. 96. P. 33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.002>
17. Chen G. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 104908. <https://doi.org/10.1063/1.3583182>
18. Eftekhari A. // Sustainable Energy Fuels. 2017. V. 1. P. 2053. <https://doi.org/10.1039/C7SE00350A>
19. Farhad S., Nazari A. // Int. J. Energy Res. 2019. 43. P. 931. <https://doi.org/10.1002/er.4332>
20. Ye Y., Shi Y., Ca N. et al. // J. Power Sources. 2012. V. 199. P. 227. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.027>
21. Qiu L., Ouyang Y., Feng Y., Zhang X. // Renewable Energy. 2019. V. 140. P. 513. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.088>
22. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. 753 с.
23. Дмитриев А.С., Клименко А.В. // Теплоэнергетика. 2020. Т. 2. С. 1. <https://doi.org/10.1134/S0040363620020010>
24. Chen L., Liu J., Fang X., Zhang Z. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2017. V. 163. P. 125. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.01.024>
25. Luo Z., Cheng W., Wei W. et al. // J. Heat. Mass Trans. 2014. V. 75. P. 262. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.072>
26. Liu J., Xu C., Chen L. et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2017. V. 170. P. 219. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.062>
27. Han G., Li H., Grossman J. // Nat. Commun. 2017. V. 8. P. 1446. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01608-y>
28. Yin H., Cao S., Liu J. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2019. 194. P. 252. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.10.022>
29. Yong K., Chan Y., Lau E., Hung Y. // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. V. 31. P. 101795. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101795>
30. Wang Y., Dai M., Wu H. et al. // Nano Energy. 2021. P. 106499. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106499>
31. Jiang J., Yang Z., Ferreira A., Zhang L. // Adv. Intell. Syst. 2022. V. 4 (5). 2100279. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100279L>
32. Yang G., Bellingham J., Dupont P. et al. // Sci. Robot. 2018. V. 3. P. 7650. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar7650>
33. Kim J., Moon C. // Int. J. Adv. Smart Convergence. 2019. V. 8 (1). P. 98. <https://doi.org/10.7236/IJASC.2019.8.1.98>
34. Junaid A., Konoiko A., Zweiri Y. et al. // Energies. 2017. V. 10. P. 803. <https://doi.org/10.3390/en10060803>
35. Rae C., Bradley F. // Ren. Sust. Energy Rev. 2012. V. 16 (9). P. 6497. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.002>
36. Kashiri N., Abate A., Abram S. et al. // Frontiers in Robotics and AI. 2018. V. 5. P. 129. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00129>
37. Жуков А.А., Кудров М.А., Заводсков С.Д. и др. // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62 (7). С. 623.
38. Bolotnik N.N., Chashchukhin V.G., Gradetsky V.G. et al. // Prospects and possibilities of using thermomechanical microrobots for solving technological tasks in space. CLAWAR 2018: 21st Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Techn. for Mobile Machines, Panama City, Panama, 10–12 September 2018 Proc. of the CLAWAR 2018. CLAWAR Association Ltd. London. P. 265.