

УДК 330.34

**С. В. Иванов, Е. Р. Орлова, Е. С. Осетров****Электрохимические системы накопления электрической энергии и тенденции их применения в мировой экономике**

*Развитие промышленности и альтернативной энергетики, систем хранения и накопления электроэнергии, необходимость повышения надежности работы специальных объектов военного и гражданского назначения формируют устойчивый спрос на использование систем накопления электрической энергии в промышленных масштабах.*

*Работа посвящена рассмотрению электрохимических систем накопления электрической энергии, в том числе их внедрения при использовании возобновляемых источников энергии, проводится обзор международного опыта и анализ экономических тенденций в данной области. В частности, анализируется применение различных технологий накопления электрической энергии. Одной из перспективных и динамично развивающихся технологий накопления электрической энергии в настоящее время являются проточные аккумуляторные батареи, которые имеют большой ресурс работы, кроме того, стоимость накопленной ими энергии ниже, чем у любого другого вторичного химического источника тока.*

*Ключевые слова: накопители электрической энергии, альтернативные источники энергии, энергетические системы, аккумуляторные батареи, электрохимические системы накопления энергии, проточные аккумуляторные батареи, химические источники тока, генерация и потребление электрической энергии, резервирование энергии.*

**Об авторах**

**Иванов Сергей Васильевич** – аспирант кафедры экономики государственного университета «Дубна». *E-mail:* phd.ivanov.sv@yandex.ru. Московская область, г. Мытищи, ул. Белобородова, д. 4В, кв. 159.

**Орлова Елена Роальдовна** – доктор экономических наук, профессор, кафедра экономики государственного университета «Дубна», Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН). *E-mail:* orlova@isa.ru.

**Осетров Евгений Сергеевич** – маркетинг-директор ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ». *E-mail:* esosetrov@gmail.com.

Производство и потребление энергии быстрыми темпами растет во всех странах мира, в значительной степени определяя прогресс жизнедеятельности человека. Усложняются процессы преобразования энергии, расширяется многообразие установок и агрегатов энергопотребления.

Помимо роста количественных показателей энергообеспеченности промышленности, транспорта, быта все большую роль играет качество энергии, что связано с рациональным использованием энергии на различных стадиях ее преобразования.

Значительное место в решении возникающих при этом проблем отводится накопителям энергии, являющихся важным промежуточным звеном между системами генерирования и системами распределения и потребления энергии. Для создания запаса электроэнергии или ее распределения она должна быть преоб-

разована в другие виды. Для решения этой задачи применяются накопители электрической энергии. Существует много различных классификаций накопителей. Наиболее удобной с практической точки зрения представляется разделение на электрохимические и физические накопители энергии. Первые преобразуют электрическую энергию в химическую энергию веществ, вторые – в механическую энергию [4]. Таким образом, к накопителям энергии относятся следующие электрические устройства: аккумуляторы [3], суперконденсаторы [5], механические накопители энергии [7] и др. [1].

Накопители электрической энергии являются важнейшим элементом энергетической системы и выполняют ряд функций, таких как выравнивание графиков нагрузки в сети (накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной (дешевой) энергии и выдачу в сеть при дефиците); обеспечение бесперебойного питания особо важных объектов. Кроме того, они могут сглаживать колебания

мощности потребителей электрической энергии и обеспечивать работу возобновляемых источников электрической энергии.

У каждого накопителя электрической энергии имеется своя ниша, но ввиду серьезного развития альтернативной энергетики становится все более актуальной задача использования накопителей для аккумуляции энергии, получаемой от нетрадиционных ви-

дов энергии: солнца, ветра и др. Это объясняется тем, что у данных источников энергии непостоянный график генерации, сильно зависящий от природных условий.

На рис. 1 представлены основные сферы применения систем накопления энергии (СНЭ) при производстве и потреблении электрической энергии.

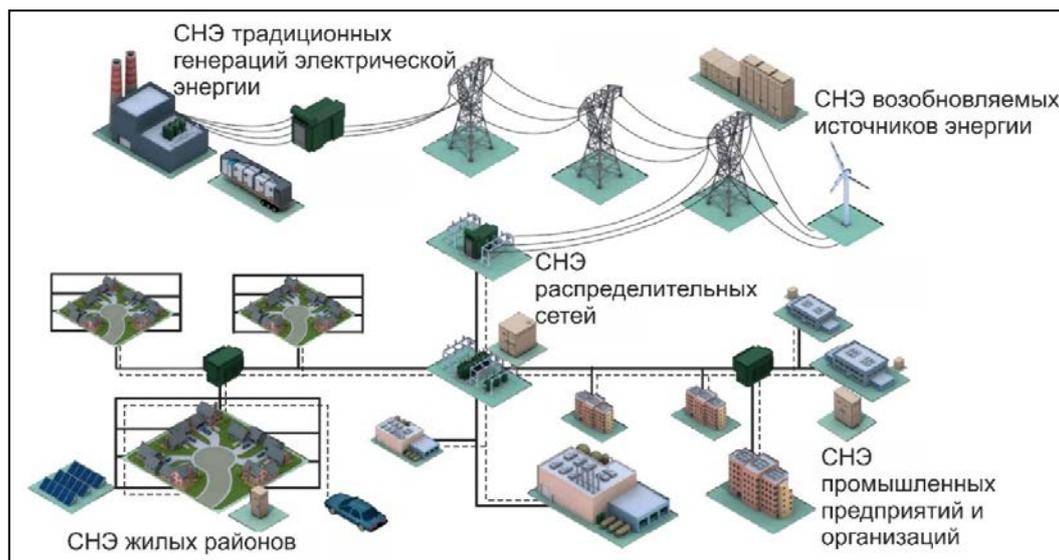


Рис. 1. Основные сферы применения систем накопления энергии (СНЭ)

Перечисленные проблемы характерны не только для России, но и для всего мира. Поэтому в данной статье рассматривается международный опыт и определение экономических тенденций в области электрохимических систем накопления электрической энергии, в том числе их применение для работы с возобновляемыми источниками энергии.

#### Мировой опыт использования электрохимических систем накопления энергии

Повсеместное развитие промышленности и альтернативной энергетики, систем хранения и накопления электроэнергии, необходимость повышения надежности работы специальных объектов военного и гражданского назначения формируют устойчивый спрос на использование систем накопления электрической энергии в промышленных масштабах. Данные обстоятельства определяют научно-практический интерес к рассмотрению экономической и общественной эффективности внедрения технологий долгосрочного аккумуляции электрической энергии.

Для изучения мирового опыта примене-

ния систем накопления энергии нами была проанализирована информация, содержащаяся в базе данных *The DOE Global Energy Storage Database*. В базе приведена информация об эксплуатации, строительстве и оснащении различных объектов системами накопления электрической энергии [10].

На рис. 2 представлены данные о распределении систем накопления энергии по способу накопления (всего нами было рассмотрено 1737 проектов).

Из рис. 2 видно, что более 60% всех реализованных проектов основаны на технологиях электрохимического накопления электрической энергии. Электрохимический способ накопления электрической энергии характеризуется обширным и динамично развивающимся рынком и широким спектром применения. В связи с этим остановимся на анализе электрохимических систем накопления энергии.

На рис. 3 приведено распределение электрохимических систем накопления энергии по странам мира. Как видно из рисунка, наибольшее количество проектов использова-

ния электрохимических систем накопления энергии реализовано в США (45,25%) и Китае (5,99%).

На рис. 4 представлено распределение

электрохимических систем накопления энергии по типу аккумуляторной батареи. Как видно из рис. 4, большая часть (более 48%) приходится на литий-ионные аккумуляторы.

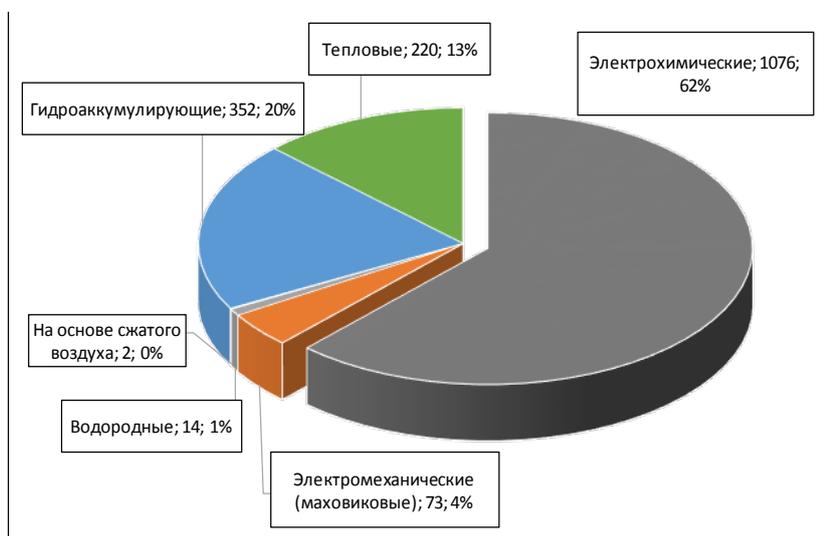


Рис. 2. Распределение систем накопления энергии по способу накопления (количество реализованных проектов и доля)

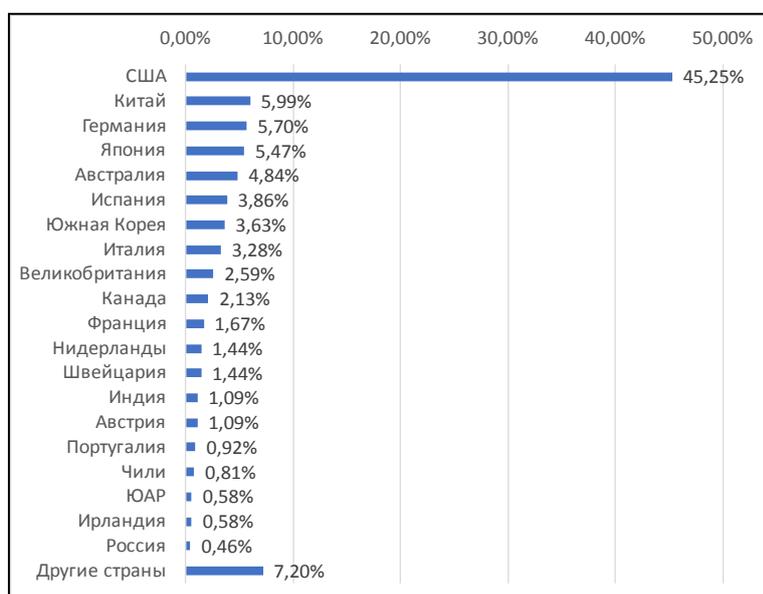


Рис. 3. Распределение электрохимических систем накопления энергии по странам мира

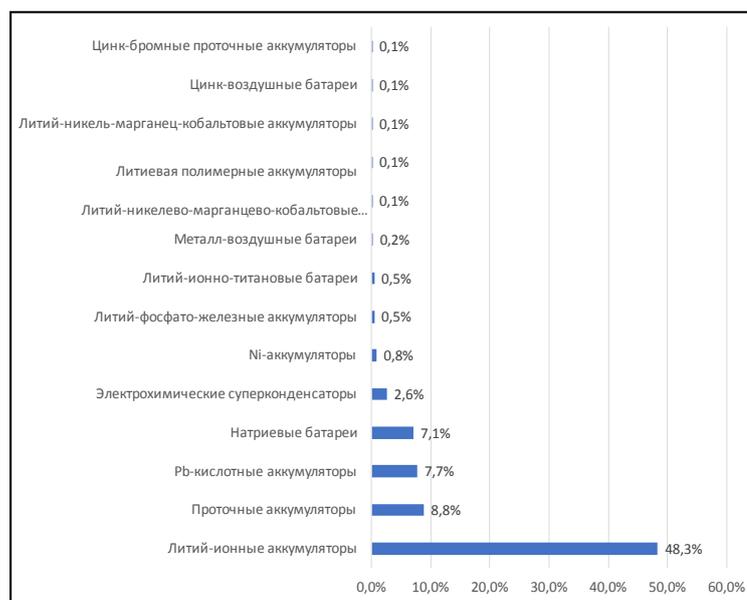


Рис. 4. Распределение электрохимических систем накопления энергии по типу аккумулятора

На наш взгляд, наибольшего внимания заслуживают проточные аккумуляторные батареи, которые имеют хорошие перспективы для применения в качестве стационарных резервных (дублирующих) источников электроэнергии.

#### **Технология проточных аккумуляторных батарей как перспективный вид накопления энергии**

Проточные аккумуляторные батареи известны давно [9], и неоднократно предпринимались попытки их применения в различных сферах деятельности [8], включая электро-транспорт.

Проточная аккумуляторная батарея – это электрическое устройство хранения энергии, представляющее собой среднее между обычной аккумуляторной батареей и топливным элементом. Жидкий электролит, состоящий из раствора металлических солей, в проточной

аккумуляторной батарее прокачивается через ядро, которое состоит из положительного и отрицательного электродов, разделенных мембраной. Возникающий между электродами ионный обмен приводит к выработке электричества. Ввиду малой удельной энергоемкости технология проточных аккумуляторных батарей предполагает их высокую эффективность при хранении больших объемов энергии, в то же время они менее эффективны для электрических агрегатов и устройств, требующих быстрого действия аккумулятора.

Применение проточных аккумуляторных батарей в различных отраслях экономики становится возможным только при стационарном резервировании большого количества энергии на длительное время в силу того, что наращивание емкости данных батарей намного дешевле, чем наращивание их мощности, данный аспект проиллюстрирован на рис. 5.



Рис. 5. Технологии накопления энергии в зависимости от времени поддержания и мощности

В нижеприведенной таблице представлено сравнение проточных аккумуляторных

батарей с другими химическими источниками накопления энергии [6].

#### Сравнение различных химических источников накопления энергии

Параметр	NiCd	Lead Acid	Li-ion	Проточные аккумуляторы
Удельная энергия, Вт·ч/кг	25–30	10–15	65–90	~20–50
Удельная энергия, Вт·ч/л	40–50	25–28	98–154	~25–50
Количество циклов (DOD 80%)	1000–1500	500–1200	>3000	>2000
Время заряда, час	5	20	2	1–20
Саморазряд, %/мес. при 20 °С	3–15	3–25	3	0
Номинальное напряжение на 1 элемент, В	1,2	2,1	3,2	1,0–2,2
Ток заряда рабочий	1С	0,2С	0,5С	до 0,25 С
Диапазон рабочих температур, °С	0/+40	0/+40	–10/+40	–20/+50
Стоимость кВт·ч с учетом срока эксплуатации, \$/кВт·ч	0,35	0,70	0,17	0,05

Таким образом, проточные аккумуляторные батареи имеют ряд преимуществ по сравнению с другими химическими источниками тока:

1. Нарастивание емкости происходит за счет увеличения объемов баков с электролитом. Стоимость электролита на основе ионов

ванадия составляет 2–4 долл./литр, а с учетом многократности использования электролита удельная стоимость полученной электроэнергии доходит до 0,05 долл./кВт·ч.

2. Большой ресурс службы.

3. Удобство обслуживания и ремонта.

Батарея сборная, поэтому при отказе или

окончании срока эксплуатации одного из узлов его можно заменить.

4. Повышенная пожаро- и взрывобезопасность, поскольку используются электролиты на водной основе.

5. Может находиться в разряженном состоянии долгое время.

6. Может заряжаться как электрическим

током, так и за счет смены электролита.

На рис. 6 представлено процентное соотношение технологий проточных аккумуляторных батарей по 107 реализованным в мире проектам. Более половины всех проектов проточных аккумуляторов 58% (62 проекта) составляют проекты, основанные на технологии ванадиевых проточных аккумуляторов.

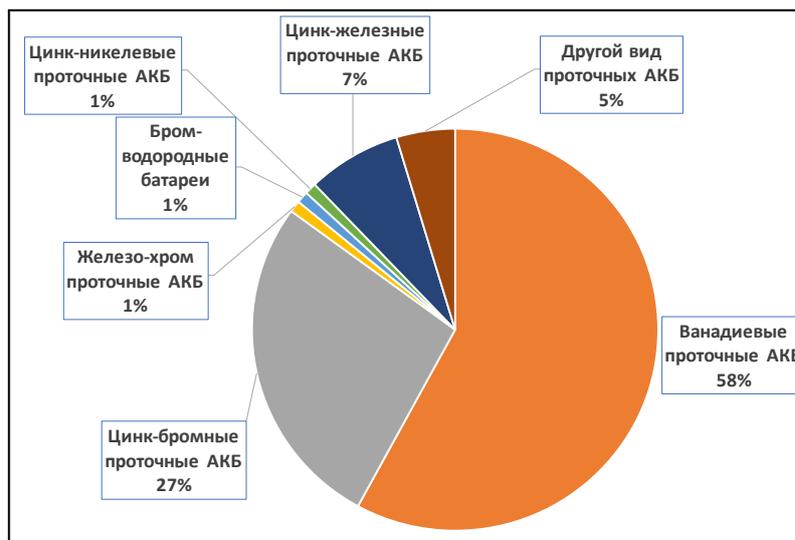


Рис. 6. Процентное соотношение технологий проточных аккумуляторных батарей

Как было указано выше, наиболее перспективной сферой применения накопителей энергии является область возобновляемых источников электрической энергии. Поэтому

нами был также проведен анализ опыта сопряжения проточных аккумуляторных батарей с генерациями электрической энергии, результаты которого представлены на рис. 7.

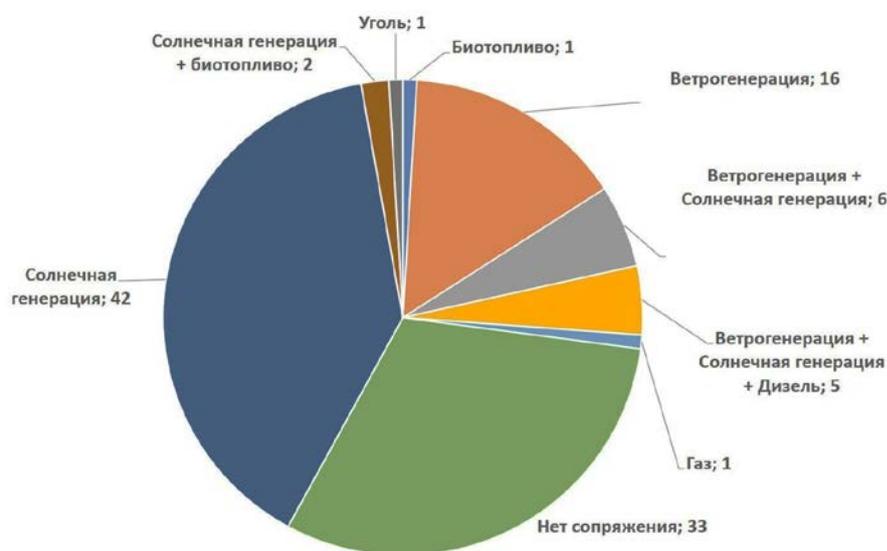


Рис. 7. Количество сопряжений проточных аккумуляторных батарей с различными генерациями электрической энергии (количество проектов)

Как видно из рис. 7, наибольшее количество реализованных в мире проектов по установке проточных аккумуляторов осуществлено при сопряжении с альтернативными источниками энергии: солнечной и ветряной генерациями. Без сопряжения с генерациями было реализовано 33 проекта. В данном случае проточные аккумуляторные батареи использовались для взаимосвязанных нагрузок, которые подключены к основной электрической сети и выступали в качестве буфера для сглаживания пиковых мощностей и заполнения энергетических впадин при неравномерной работе основной электрической сети.

Проточные аккумуляторные батареи могут быть применены для длительного сохранения электрической энергии и имеют хорошие стоимостные характеристики с перспективой снижения стоимости запасенных кВт·ч энергии [2]. Европейская ассоциация развития технологий накопления энергии совместно с Европейским альянсом энергетических исследований разработали дорожную карту развития систем накопления энергии до 2030 г. В дорожной карте прописана тенденция к уменьшению стоимости, улучшению технического уровня и потребительских характеристик, в том числе массо-габаритных размеров проточных аккумуляторных батарей.

Снижение стоимости электрохимических систем накопления энергии, в частности проточных аккумуляторных батарей, а также улучшение их технических характеристик уже в ближайшие годы расширит рынок этих устройств, что, в свою очередь, приведет к снижению цены и расширению области их применения.

#### **Разработка и применение технологий проточных аккумуляторных батарей в России**

В условиях России наиболее важным ограничением для использования проточных аккумуляторных батарей является существующий диапазон рабочих температур – от  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Величина этого диапазона обусловлена, прежде всего, свойствами электролитов. Поэтому для нашей страны наиболее показа-

тельным является опыт использования проточных аккумуляторных батарей в Канаде, имеющей схожие климатические условия и экономику, базирующуюся на добыче углеводородов.

Для эффективного применения накопителей данного типа в российских регионах необходимы дополнительные исследования, нужно оценить влияние различных добавок в электролиты и возможности перехода на новые электролиты, способные работать в более широком диапазоне температур.

На рис. 8 представлены потенциальные отрасли применения проточных аккумуляторных батарей в России. В настоящее время в России применение проточных аккумуляторных батарей не является массовым. Однако в стране есть все необходимые ресурсы и возможности для существенного их роста и даже серийного производства.

#### **Заключение**

Проведенный нами анализ мирового опыта показал, что в настоящее время в мире активно применяются накопители электрической энергии, в том числе проточные аккумуляторные батареи для резервирования большого (более 1 МВт·ч) объема электрической энергии. Причем они используются даже при работе с возобновляемыми источниками энергии.

Проточные аккумуляторные батареи имеют ряд преимуществ по сравнению с другими химическими источниками тока. В России, несмотря на большой потенциал данной технологии (наличие большей части необходимых ресурсов и оборудования), пока не предпринято эффективных шагов по ее практической реализации. Первые попытки промышленного применения проточных АКБ в России предпринимаются силами ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» (г. Дубна Московской области).

В перспективе в России проточные аккумуляторные батареи смогут занять определенную нишу и использоваться в энергетических системах, нуждающихся в дешевом и эффективном накоплении электрической энергии.

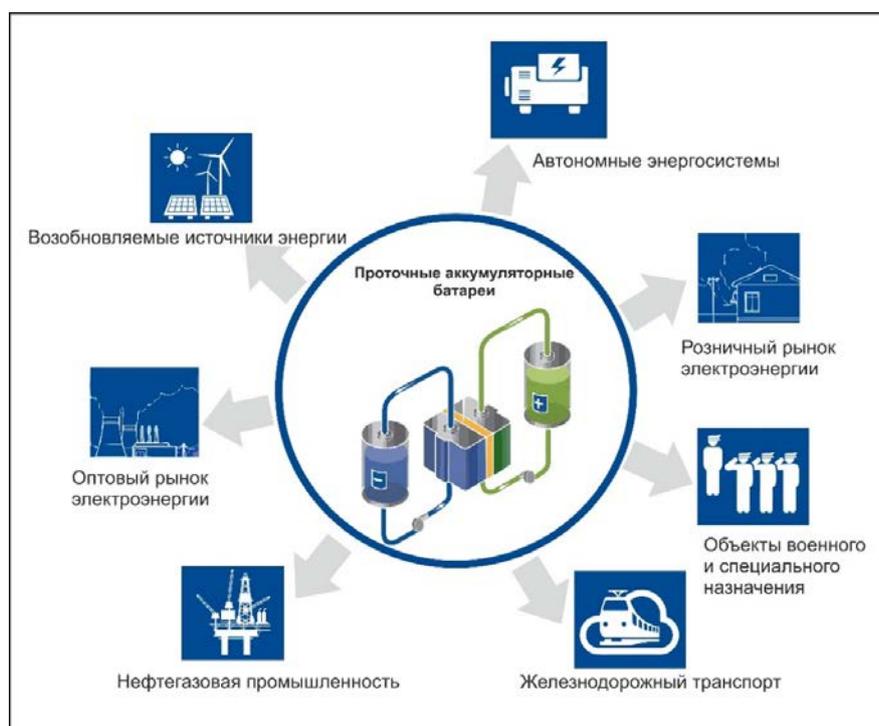


Рис. 8. Потенциальные отрасли применения проточных аккумуляторных батарей в России

### Библиографический список

1. Багоцкий, В. С. Химические источники тока / В.С. Багоцкий, А.М. Скундин. – М. : Энергоиздат, 1981. – 360 с.
2. Дарьенков, А. Б. Автономная высокоэффективная электрогенерирующая станция / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Тр. Нижегородского государственного технического университета. Т. 77. – Н. Новгород : НГТУ, 2009. – С. 68–72.
3. Методы улучшения эксплуатационных характеристик свинцовых аккумуляторов в составе установок, действующих на энергии возобновляемых источников / В.В. Колосовский, В.Л. Колнышенко // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2014. – № 37. – С. 232–237.
4. Обзор аккумуляторных накопителей: [Электронный ресурс] // ООО «Литий-ионные технологии». – М., 2011–2018. URL: [http://www.liotech.ru/sectornews\\_207\\_437](http://www.liotech.ru/sectornews_207_437) (режим доступа: свободный. Дата обращения: 26.11.2018).
5. Перспективы применения суперконденсаторов в качестве альтернативы аккумуляторам / В.Г. Еналдиев, Д.В. Меркушев // Научные исследования: от теории к практике. – 2015. – Т. 2, № 4 (5). – С. 32–34.
6. Резервное электроснабжение специальных объектов. Перспективные направления исследова-

ний и имеющийся научно-технический задел / Н.В. Тингаев, А.Н. Воропай, В.В. Иванов // Актуальные вопросы развития систем автономного электро-снабжения объектов Министерства обороны Российской Федерации: сборник докладов круглого стола, проведенного в рамках научно-деловой программы Международного военно-технического форума «Армия–2017». – Спб. : Санкт-Петербургский политех. ун-т Петра Великого. – 2017. – С. 261–271.

7. Сравнительный анализ систем запасаения энергии и определение оптимальных областей применения современных супермаховиков / М.А. Соколов, В.С. Томасов, R.P. Jastrzębski // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 4. – С. 149–155.

8. Skyllas-Kazacos, M. An historical overview of the Vanadium Redox Flow Battery developed at the university of New South Wales, Australia. –2007. – October. – URL: [www.vrb.unsw.edu.au/](http://www.vrb.unsw.edu.au/) (ежим доступа: свободный. Дата обращение: 02.06.2017).

9. Rahman, F. Vanadium Redox Battery: Positive Half-Cell Electrolyte Studies / F. Rahman, M. Skyllas-Kazacos // Journal of Power Sources. — 2008. – V. 39. – P. 2031–2039.

10. The DOE Global Energy Storage Database: Sandia Corporation, 2018. [Электронный ресурс]. – URL: <http://energystorageexchange.org> (режим доступа: свободный. Дата обращения 26.11.2018).