

# ТРАНСПОРТ

УДК 621.331

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-1-112>

## МЕТОДИКА ВЫБОРА ТИПА АККУМУЛЯТОРА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В РЕГИОНАХ С ХОЛОДНЫМ КЛИМАТОМ

**Е. Е. Терентьев<sup>1</sup>, И. М. Блянкинштейн<sup>2</sup>**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>e-mail: egor9843@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: blyankinshtein@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается вопрос оценки эффективности высоковольтных батарей электрифицированных транспортных средств при низкотемпературной эксплуатации. Представлена методика выбора электрохимического типа аккумуляторов для эксплуатации в регионах с холодным климатом, включающая в себя экспериментальное получение зарядно-разрядных характеристик высоковольтных батарей в условиях нормальных и пониженных температур и их аналитическое исследование. В результате апробации методики получены регрессионные зависимости, описывающие процессы заряда-разряда аккумуляторов различных электрохимических типов (Li-Ion, LiFePO<sub>4</sub>, LTO) в функции от температуры окружающей среды. В связи с появлением новых электрохимических типов аккумуляторов, обладающих повышенной сопротивляемостью к переохлаждениям, предлагаемая методика позволит оценить их эффективность и полноценно использовать электрические автомобили в регионах с холодным климатом.

**Цель исследования** – разработка методики выбора аккумуляторов для низкотемпературной эксплуатации электромобилей и гибридов на основании экспериментального исследования и сравнения результатов.

**Используемый подход** – натурное моделирование низкотемпературной эксплуатации высоковольтных батарей в лабораторных условиях.

**Используемый метод** – математическое планирование эксперимента, корреляционно-регрессионный анализ экспериментальных данных с построением математических моделей заряда – разряда.

**Основные результаты** – разработана и апробирована методика выбора электрохимического типа аккумулятора для эксплуатации в регионах с холодным климатом.

**Новизна исследования** представлена математическими моделями, описывающими изменение емкости высоковольтных батарей в зависимости от температуры, предложена методика выбора аккумулятора для низкотемпературной эксплуатации.

**Направление дальнейших исследований** – уточнение моделей, исследование низкотемпературных свойств новых и перспективных типов химических элементов высоковольтных батарей.

**Ключевые слова:** высоковольтная батарея, низкие температуры, эксплуатация, емкость аккумулятора, электромобили, ресурсный тест.

**Для цитирования:** Терентьев Е. Е., Блянкинштейн И. М. Методика выбора типа аккумулятора для эксплуатации электромобилей в регионах с холодным климатом // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 1. – С. 112–124, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-1-112>.

## METHODOLOGY FOR SELECTING THE TYPE OF BATTERY FOR OPERATION OF ELECTRIC VEHICLES IN COLD REGIONS

**E. E. Terentiev<sup>1</sup>, I. M. Blyankinshtein<sup>2</sup>**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup>e-mail: egor9843@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: blyankinshtein@mail.ru

**Abstract.** The issue of evaluating the efficiency of high-voltage batteries of electrified vehicles at low temperatures is considered. A technique is presented for selecting the electrochemical type of batteries for operation in regions with a cold climate, which includes experimental obtaining of the charge-discharge characteristics of high-voltage

batteries under conditions of normal and low temperatures and their analytical study. As a result of testing the methodology, regression dependences were obtained that describe the processes of charge-discharge of batteries of various electrochemical types (Li-Ion, LiFePO<sub>4</sub>, LTO) as a function of temperature. In connection with the emergence of new electrochemical types of batteries with increased resistance to hypothermia, the proposed method will allow us to evaluate their effectiveness and fully use electric cars in regions with a cold climate.

The purpose of the study is to develop a methodology for selecting batteries for low-temperature operation of electric vehicles and hybrids based on an experimental study and comparison of results.

The method used is mathematical planning of the experiment, correlation-regression analysis of experimental data with the construction of mathematical models of charge-discharge.

Main results – a method for choosing an electrochemical type of battery for operation in regions with a cold climate was developed and tested.

The novelty of the study is represented by mathematical models that describe the change in the capacity of high-voltage batteries depending on temperature.

The direction of further research is the refinement of models, the study of the low-temperature properties of new and promising types of chemical elements of high-voltage batteries.

**Keywords:** high-voltage battery, low temperatures, operation, battery capacity, electric vehicles, life test.

**Cite as:** Terentiev, E. E., Blyankinshtein, I. M. (2023) [Methodology for selecting the type of battery for operation of electric vehicles in cold regions]. *Интеллект. Инновации. Инвестиции* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 112–124, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-1-112>.

## Введение

Рост цен на топливо, обостряющаяся экологическая обстановка, ограниченность ресурсов нефти на Земле – все это делает альтернативные источники энергии более актуальными. Получают развитие транспортные средства с электрическими двигателями – гибриды и электромобили. Их достоинства: экономичность, экологичность, бесшумность, динамичность. Основной недостаток – проблемы при эксплуатации в условиях низких температур окружающей среды. Современные электромобили и гибриды оборудованы высоковольтными батареями (ВВБ) из литий-ионных аккумуляторов Li-Ion (например, Tesla Model 3), никель-металлогидридных аккумуляторов Ni-MH, (например, Toyota Prius), литий-железо-фосфатных аккумуляторов LiFePO<sub>4</sub> (например, электрокары), литий-титанатных аккумуляторов LTO.

Используемые на данный момент электрохимические типы аккумуляторов теряют большую часть емкости при переохлаждении, что затрудняет использование электропривода в холодных регионах. Снижение емкости аккумулятора приводит к частым перезарядкам, ускоренной потере ресурса и нерациональному использованию накопленной мощности. Например, ВВБ Toyota Prius 20 при температуре -20 – уже не запустится, а гибрид сможет начать движение только за счет ДВС. На отопление батареи штатными системами уйдет около часа, следовательно, при повседневном использовании, например, до рабочего места и обратно, ВВБ так и не включится в работу. Постоянные циклические переохлаждения ВВБ будут постоянно снижать ресурс и уменьшать все топливную экономичность, так как гибрид будет эксплуатироваться только за счет ДВС.

Также необходимо учитывать и способность заряжаться и принимать энергию на холоде.

Для повышения эффективности эксплуатации электротранспорта в условиях холодного климата необходимо использовать более стойкий к переохлаждениям электрохимический тип аккумуляторов.

Проблема эксплуатации электромобилей при низких температурах сегодня актуальна, ее аспекты рассмотрены в различных работах. Подробно аспекты работы аккумуляторов при низких температурах рассмотрены в работе [19]. В данной работе автор рассматривает конструкцию аккумуляторов на основе оксида лития-кобальта (LiCoO<sub>2</sub>) для использования при низких температурах, и проводит ресурсные тесты при различных температурах окружающей среды, моделируя эксплуатацию электромобиля.

В работе [12] авторы анализируют влияние скорости электромобиля и температуры окружающей среды на частоту отказов разных узлов. В заключении предлагается модель надежности и математический аппарат, описывающий поток отказов узлов при различных скоростях движения и температурах эксплуатации. Однако авторы не рассматривают различные электрохимические типы аккумуляторов.

В работе [1] рассмотрены и сравнены различные параметры свинцово-кислотных, никель-кадмиевых, никель-металлогидридных и литий-ионных аккумуляторов. В статье подробно рассматриваются различные преимущества и недостатки различных электрохимических типов, однако не учтены наиболее используемые типы: литий-полимерный и литий-железо-фосфатные.

Имеются работы схожей тематики, направленные на исследование работы свинцово-кислотной стартерной батареи в зимний период. В статье [2] автор предлагает алгоритм имитационной модели формирования уровня заряженности АКБ и исследу-

дует уровень заряженности и температуры АКБ.

В статье [3] приводятся результаты экспериментов по определению характеристик АКБ при различных температурах. Приведены вольтамперные характеристики АКБ емкость 60 Ач при различных температурах и зависимости внутренних сопротивлений АКБ от температуры электролита. В указанных статьях [2; 3] рассматриваются только свинцово-кислотные аккумуляторы, используемые в автомобилях с двигателем внутреннего сгорания.

В проанализированных источниках [1–20] не рассматриваются литий-титанатные и литий-железо-фосфатные аккумуляторы, обладающие широким температурным диапазоном работы, что подчеркивает актуальность настоящего исследования.

На основании проведенного анализа поставлена цель исследования: разработка методики выбора аккумуляторов для низкотемпературной эксплуатации электромобилей и гибридов на основании экспериментального исследования и сравнения результатов.

#### План и методика эксперимента

На сегодняшний день в электромобилях широко

применяются аккумуляторы на основе лития: Li-Ion, LiFePO<sub>4</sub>, LTO, однако отсутствуют достоверные оценки и закономерности изменения их эффективности в условиях эксплуатации при низких температурах. При анализе вопроса выяснено также, что отсутствует формализованная методика исследования, тестирования и выбора наиболее эффективного для работы при низких температурах электрохимического типа аккумулятора.

Для определения показателей и закономерностей разрядно-зарядных характеристик при низких температурах проведен эксперимент. Целью эксперимента являлось на основе эмпирически полученных для каждого электрохимического типа аккумулятора разрядных графиков определение зависимости доступной емкости от температуры.

Исследуемыми факторами выступают температура ( $X$ ) и емкость ( $Y$ ) аккумулятора. Температура выступает управляемым фактором: изменяя температуру, будем оценивать изменение емкости аккумулятора. Формализованное представление решаемой задачи можно представить следующим образом. Нужно исследовать и определить вид математической зависимости:

$$Y = f(X), \quad (1)$$

где

$Y$  – это функция отклика (емкость аккумулятора, в % от номинальной паспортной емкости, указанной в мАч или в Ватт-часах);

$X$  – это управляемый фактор (температура на поверхности корпуса аккумулятора, °C);

Уровни фактора  $X = [20^\circ; 0^\circ; -5^\circ; -10^\circ; -15^\circ; -20^\circ]$ . Погрешность измерения температуры составит 0,5 °C. Для проведения разрядных испытаний была собрана нагрузочная цепь (рисунок 1).

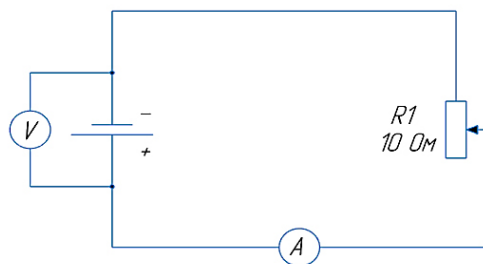


Рисунок 1. Нагрузочная цепь аккумулятора

Источник: составлено авторами

Нагрузкой в цепи выступает переменный резистор ППБ-15Д. Для измерения значений напряжения и тока использовались мультиметры ТЕК DT 835 с погрешностью измерений  $\pm 1,2\%$ .

Исследуемыми образцами являлись аккумуляторы Li-Ion, LiFePO<sub>4</sub>, LTO емкостью 1,5 Ач, имитирующие работу высоковольтных батарей, собранных из аккумуляторов таких же типов. Количество образцов каждого типа – 3, что позволяло прово-

дить параллельные опыты.

Для создания низких температур использовалась морозильная камера. Температура аккумуляторов и температура внутри морозильной камеры контролировались пирометром «Мегеон 16400» с диапазоном измеряемых температур от  $-50^\circ\text{C}$  до  $+350^\circ\text{C}$  и с погрешностью  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ .

В ходе эксперимента исследовалась возможность заряжать аккумуляторы, поэтому сразу же

после разряда при  $-20^{\circ}\text{C}$  аккумуляторы заряжались.

Зарядка аккумуляторов производилась с помощью понижающего dc-dc преобразователя. Использование данного устройства позволило корректно заряжать аккумуляторы с помощью двух режимов: CC – constant current, режим с постоянным заданным значением тока, необходимый для быстрой зарядки как правило всей доступной емкости; CV – constant voltage, который имел защитную функцию.

Эксперимент проводился следующим образом. Аккумуляторы при комнатной температуре заряжались до максимума и затем разряжались для определения их реальной емкости; процесс регистрировался во времени. Разрядный ток устанавливался  $1,5 \text{ А} \times \text{ч}$ , и при таком токе аккумулятор емкостью  $1500 \text{ мАч}$  номинально должен разрядиться за 1 час. Индикатором степени заряда выступал уровень напряжения (В), который выдает аккумулятор. Разряд длился до минимально допустимого значения напряжения (для Li-Ion и LiFePO4  $2,5\text{В}$ , для LTO  $1,5\text{В}$ ).

Поскольку электрическая цепь была одна и та же для всех испытуемых аккумуляторов, то их емкость приблизительно оценивалась временем разряда. Далее аккумуляторы перезаряжались и помещались в морозильную камеру, где охлаждались до заданной температуры, после чего разряжались, определялась емкость, отдаваемая охлажденным аккумулятором. На основе полученных данных были построены графики разряда во времени. Для LiFePO4 и LTO аккумуляторов проводились охлаждение и зарядка при  $-20^{\circ}\text{C}$ , при этом оценивалась их емкость.

### Результаты исследования и их анализ

Первый тест проходил при комнатной температуре для определения максимально допустимой емкости аккумулятора. Первичные результаты представлены в виде разрядных кривых на рисунке 2. По оси ординат показана степень заряженности аккумулятора. По оси абсцисс представлено время, которое занял разряд аккумулятора.

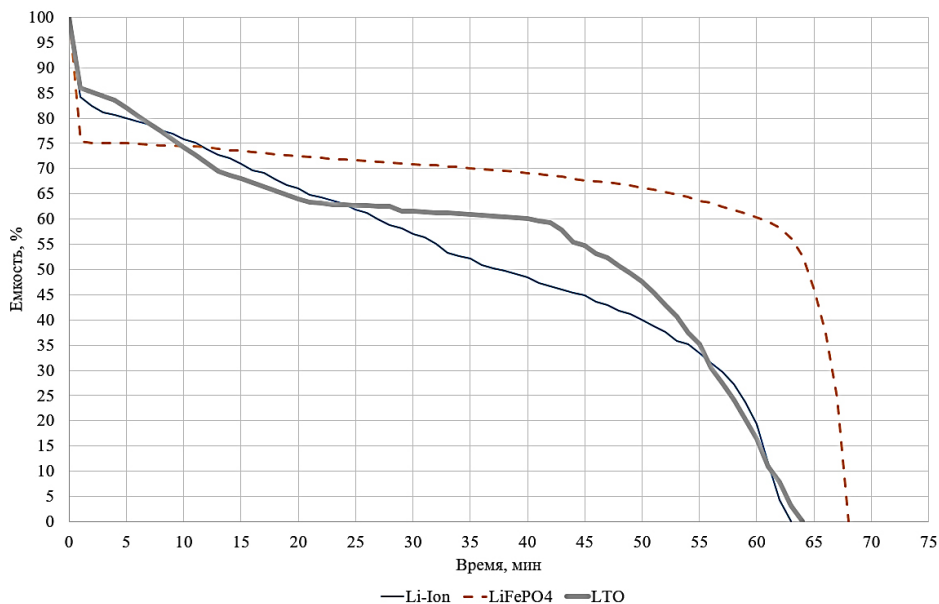


Рисунок 2. Разрядные кривые аккумуляторов при  $20^{\circ}\text{C}$

Источник: составлено авторами

Реальная емкость Li-Ion составила  $1575 \text{ мАч}$ , у LTO аккумулятора –  $1625 \text{ мАч}$ , у LiFePO4 –  $1700 \text{ мАч}$ .

В дальнейшем получены разрядные кривые для температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$  с шагом  $-5^{\circ}\text{C}$ .

Представляет интерес опыт при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ . Как можно заметить по графикам разрядных кривых (рисунок 3), время разряда сократилось почти вдвое. Это связано с переохлаждением аккумуляторов и вследствие этого с потерей реальной емкости. Наиболее хороший результат показал LTO аккумулятор – время разряда заняло 47 минут, потеря от максимальной емкости составила 28%.

У LiFePO4 аккумулятора время разряда составило 44 минуты, потеряв 35% от своей реальной емкости. У Li-Ion аккумулятора время разряда заняло 35 минут и он потерял 44% от своей реальной емкости.

В дальнейшем тесте при  $-20^{\circ}\text{C}$  Li-Ion аккумулятор не использовался из-за ухудшения характеристик. Для сравнения остались два электрохимических типа: LTO и LiFePO4.

Как можно заметить по графикам на рисунке 4, температура  $-20^{\circ}\text{C}$  является пороговой температурой для разряда аккумуляторов емкостью  $1500 \text{ мАч}$ , несмотря на заявления изготовителей о работе при более низких температурах.

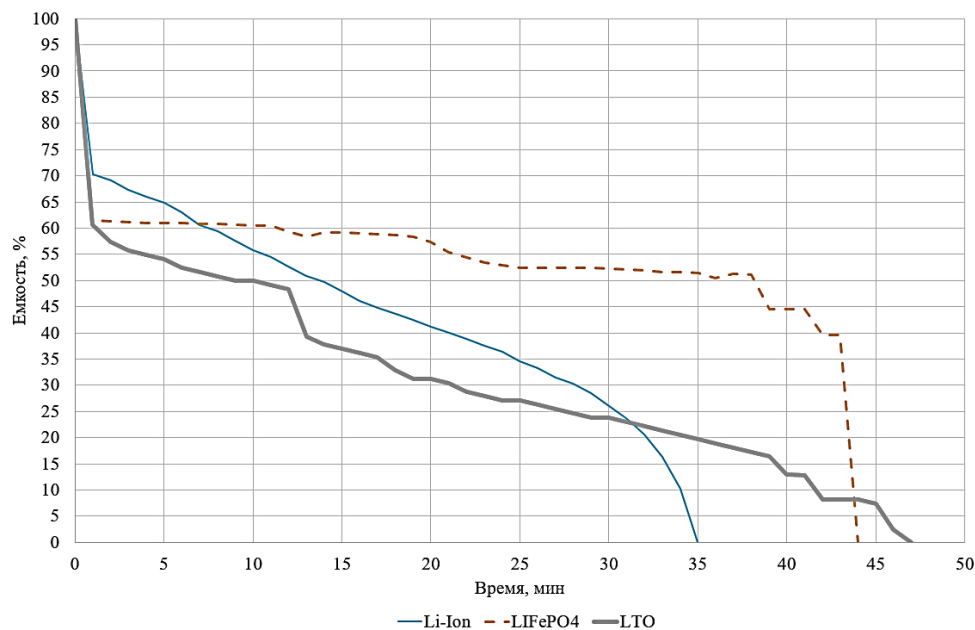


Рисунок 3. Разрядные кривые при -15 °C  
 Источник: составлено авторами

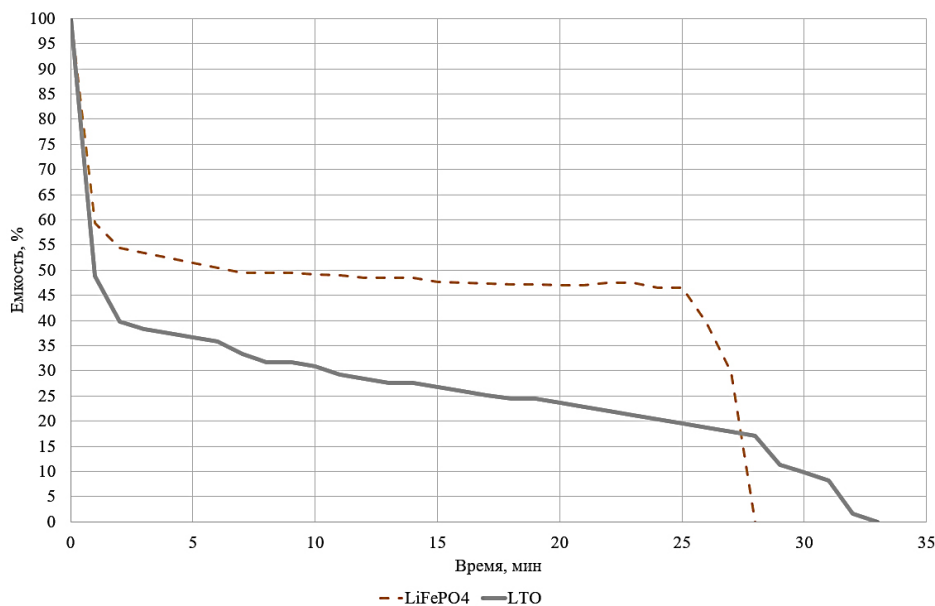


Рисунок 4. Разрядные кривые при -20 °C  
 Источник: составлено авторами

Как показали эксперименты, LTO аккумулятор наиболее приспособлен к эксплуатации при низких температурах. Процент неиспользованной реальной емкости в этом тесте составил для LTO: 49%, для LiFePO4: 59%.

На основе полученных данных выявлена зависимость для каждого химического типа, отражающая процент доступной емкости от температуры аккумулятора. По оси ординат отложена доступная емкость в процентах, по оси абсцисс отложена

температура аккумулятора.

Полученные данные обрабатывались в Microsoft Excel. На их основе построена точечная диаграмма и подобраны наиболее подходящие функции для описания, посчитаны статистические коэффициенты, отражающие адекватности полученной модели. Полученные регрессионные уравнения для описания разрядных процессов при разных температурах сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Регрессионные уравнения для разряда

| Тип и температура аккумулятора | Вид регрессионного уравнения  |
|--------------------------------|---|
| LTO                            | $y = -0,1724x^2 - 0,9743x + 99,8476$ , при $x = [0; -5 \text{ °C}; -10 \text{ °C}; -15 \text{ °C}; -20 \text{ °C}]$ |
| Li-Ion                         | $y = -0,2333x^2 - 0,70x + 99$ , при $x = [0; -5 \text{ °C}; -10 \text{ °C}; -15 \text{ °C}]$                        |
| LiFePO4                        | $y = -0,20x^2 - 0,960x + 100,1333$ , при $x = [0; -5 \text{ °C}; -10 \text{ °C}; -15 \text{ °C}; -20 \text{ °C}]$   |

Источник: составлено авторами

По полученным формулам можно с высокой вероятностью спрогнозировать потерю емкости таких аккумуляторов при определённой температуре. По

данным формулам для каждого химического типа были просчитаны значения доступной емкости (рисунок 5).

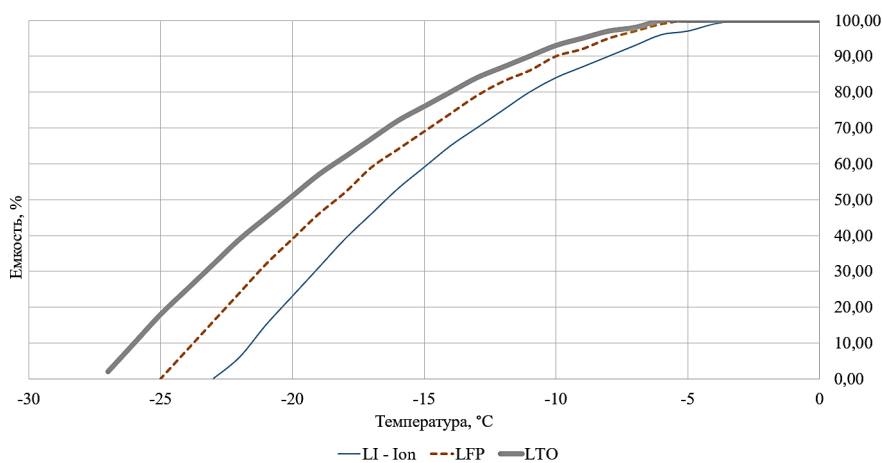


Рисунок 5. Зависимость доступной емкости от температуры для каждого аккумулятора

Источник: составлено авторами

Установлена отличительная черта LTO и LiFePO4 аккумуляторов – способность заряжаться при низких температурах. Исследовались характеристики заряда рассмотренных типов аккумуляторов при низких температурах. После охлаждения

и разряда при  $-20 \text{ °C}$  аккумуляторы сразу же ставились на зарядку. По результатам тестирования заряда аккумуляторов при низких температурах также были построены регрессионные зависимости, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2. Регрессионные уравнения для фазы зарядки

| Тип и температура аккумулятора | Вид регрессионного уравнения   |
|--------------------------------|--|
| LTO 20 °C                      | $Y = 0,00001t^3 - 0,001t^2 + 0,306t + 2,107$   |
| LTO -20 °C                     | $Y = 0,0001t^3 - 0,0051t^2 + 0,0892t + 2,043$  |
| LiFePO4 20 °C                  | $Y = 2 \cdot 10^{-8}t^5 - 3 \cdot 10^{-6}t^4 + 0,0002t^3 - 0,0074t^2 + 0,1097t + 2,7428$ |
| LiFePO4 -20 °C                 | $Y = 0,0003t^3 - 0,0129t^2 + 0,164t + 2,4684$  |

Источник: составлено авторами

Исследованию подвергалась фаза зарядки при постоянном токе (фаза *CC*), так как именно эта фаза заряжает основную ёмкость аккумулятора. На данных графиках (рисунок 6) изображена только фаза

зарядки *CC*. Для расчета емкости фазой *CV* можно пренебречь, т.к. основная емкость аккумулятора уже заряжена, а *CV*-фаза носит энергосберегающий и защитный характер.

Площадь под графиком  $U(t)$  показывает, как наполнялась емкость аккумулятора с течением времени. Произведение определённого интеграла функции  $U(t)$  на ток заряда позволяет получить емкость аккумулятора, выраженную в Ватт-часах. Граница-

ми определённого интеграла являются время начало зарядки (принятое нулю), когда напряжение было минимально допустимым, и время окончания зарядки, когда напряжение достигает максимально допустимого значения, выраженное в часах.

$$C = I \cdot \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} U(t)dt, \tag{2}$$

где

$I$  – ток заряда,  $A$ ;

$t_{\max}$  и  $t_{\min}$  – время окончания и начала зарядки аккумулятора соответственно, ч;

$U$  – напряжение аккумулятора.

Помимо графического сравнения емкостей, решив определенные интегралы от найденных функций, можно численно сравнить полученные значе-

ния для выбора наиболее подходящего электрохимического типа.

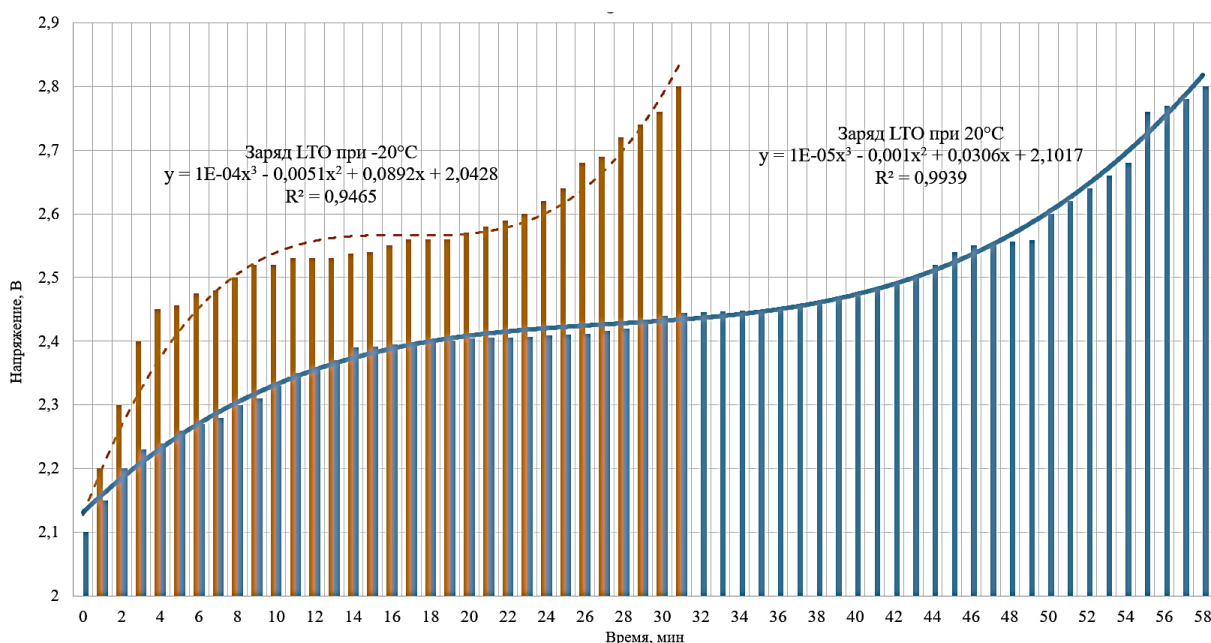


Рисунок 6. Интегрирование зарядных кривых для LTO аккумулятора

Источник: составлено авторами

Падение емкости заряда при охлаждении  $LiFePO_4$  аккумуляторов до  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  составило 68%. В тестировании на разряд при такой же температуре аккумуляторы теряли около 60%. На основе полученных данных можно констатировать, что данные аккумуляторы при низких температурах хуже заряжаются, чем разряжаются, а также имеют более низкую эффективность при работе в переохлажденном состоянии, чем LTO аккумуляторы. Использование LTO аккумуляторов позволит эффективнее запастись энергией.

### Формализованное представление методики выбора типа аккумулятора

Теперь, в результате проведенного исследования, мы можем формализовать методику выбора электрохимического типа аккумулятора для эксплуатации в регионах с холодным климатом в виде блок-схемы (рисунок 8). Она содержит совокупность входных параметров, последовательность операций и итоговые параметры, на основании которых можно принять решение по выбору наиболее эффективного типа аккумулятора для эксплуатации в регионах с холодным климатом.

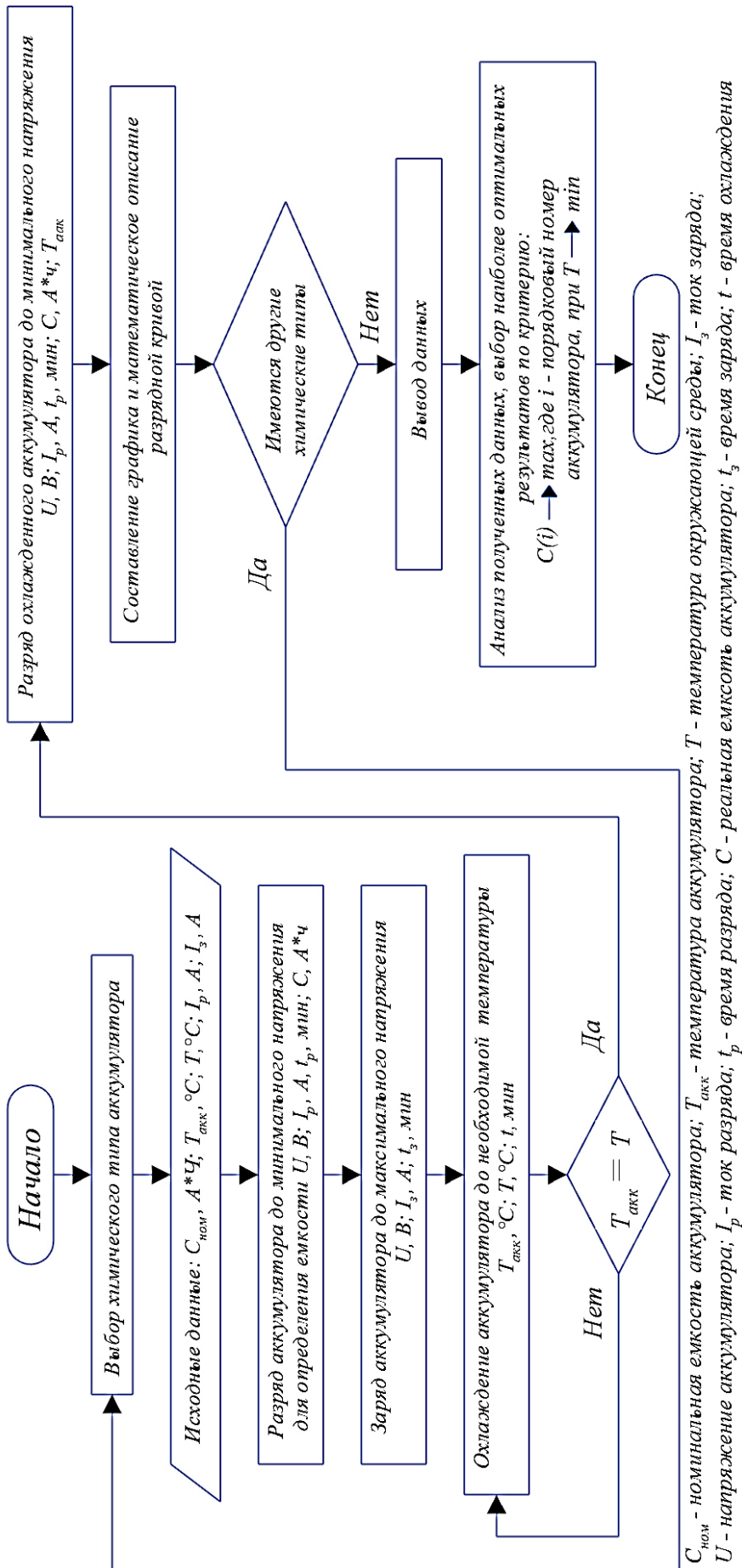


Рисунок 8. Блок-схема методики выбора электрохимического типа аккумулятора для эксплуатации в регионах с холодным климатом  
Источник: составлено авторами



Предлагаемая методика позволяет определить и оценить потери емкости различных электрохимических типов при различных низких температурах. Основу методики представляет ресурсный тест аккумуляторов, с несколькими циклами заряда-разряда при различных температурах. Данная часть позволит определить ресурс аккумулятора в различных температурных диапазонах. Основным параметром для выбора типа аккумулятора является реальная емкость, полученная в ходе ресурсных тестов. Сведение данных в таблицу и построение разрядных кривых тестируемых аккумуляторов позволит математически оценить потери емкости при различных температурах более наглядно, а также учесть особенности тестируемых электрохимических типов и спрогнозировать изменение ресурса при низкотемпературной эксплуатации. Например, во время разряда при  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 3) литий-железо-фосфатные и литий-титанатные аккумуляторы потеряли 35% и 28% емкости соответственно, но литий-железо-фосфатные аккумуляторы показывали стабильное напряжение на протяжении почти всего разряда, не смотря на большие потери реальной емкости, чем литий-титанатные. При рассмотрении только данного температурного диапазона можно выбирать между двумя аккумуляторами, прогнозируя небольшую разницу потери реальной емкости (около 7%). При более низких температурах разница в емкостях будет увеличиваться, как, например, во время разряда при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 4). Разница в емкостях уже увеличилась до 10% при снижении температуры на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в первую очередь постепенное увеличение емкости при снижении температуры говорит о более высокой сопротивляемости переохлаждению у литий-титанатных аккумуляторов, а значит данный электрохимический тип более эффективен при эксплуатации при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и более низких температурах, несмотря на свои недостатки: низкое номинальное напряжение, низкую энергетическую плотность.

Предложенная методика оценивает и сравнивает теоретический ресурс электрохимических типов на основе лития. С помощью проведенных ресурсных тестов можно усредненно оценивать потери реальной емкости каждого электрохимического типа. Однако имеются недостатки и планируется усовершенствование предлагаемой методики: не учитывается влияние низких температур на ресурс аккумулятора (насколько снизится количество циклов перезарядки при постоянной эксплуатации при таких температурах), зависимость потери реальной емкости аккумуляторов из-за переохлаждения от ресурса (в эксперименте принимали участие новые аккумуляторы, не использующиеся до этого в работе), в экспериментах использовались только аккумуляторы с низкой емкостью, и не учитываются особенности больших емкостей (ресурсные тесты

при  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  уже были невозможны, так как тестируемые аккумуляторы с емкостью всего 1,5 Ач замерзали), во время проведения ресурсных тестов не было доступа к программно-аппаратным измерительным приборам, которые имеют более высокую точность измерения, чем мультиметры и позволяют выводить данные в компьютерных программах.

### Заключение

В статье рассмотрена проблема эксплуатации электромобилей и гибридов при низких температурах. Проведен анализ научных работ по данной тематике. Спланирован и проведен эксперимент для оценки потери ресурса используемых электрохимических типов. На основе результатов эксперимента составлены графики и математический аппарат для описания полученных результатов. Разработана методика выбора химического типа аккумуляторов для эксплуатации в регионах с холодным климатом, включающая в себя экспериментальное получение зарядно-разрядных характеристик аккумуляторов в условиях нормальных и пониженных температур и их аналитическое исследование. В результате апробации методики получены регрессионные зависимости, описывающие процессы заряда-разряда аккумуляторов (Li-Ion, LiFePO<sub>4</sub>, LTO) в функции от температуры. Определение доступной емкости аккумулятора в Ватт-часах осуществляется как произведение определённого интеграла функции  $U(t)$  на ток заряда.

По результатам исследования, приведённого в статье, наиболее подходящим для низкотемпературной эксплуатации является LTO аккумулятор. Несмотря на свои основные недостатки в сравнении с другими исследуемыми типами: низкая плотность энергии и низкое номинальное напряжение, LTO аккумуляторы показали наименьшую потерю емкости при переохлаждении. С учетом указанных недостатков собранная из LTO аккумуляторов батарея будет больше по размерам и тяжелее, чем батареи, собранные из других типов аккумуляторов, но LTO батарея лучше сохранит свой ресурс и потеряет меньше емкости из-за переохлаждения.

Методика требует доработок. В процессе проведения опытов и создания математического аппарата не учитывался ресурс аккумуляторов, в эксперименте принимали участие новые аккумуляторы. В процессе эксплуатации ресурс аккумуляторов уменьшается, снижается реальная емкость, что потребует более частых перезарядок. Аналогичная потеря ресурса происходит и при низкотемпературной эксплуатации. Теоретически можно предположить, что по мере эксплуатации аккумулятора потеря емкости при переохлаждении увеличивается, но экспериментальное подтверждение и оценка взаимосвязи ресурса аккумулятора и температуры эксплуатации отсутствует.

В связи с появлением новых электрохимических типов аккумуляторов, обладающих повышенной сопротивляемостью к переохлаждениям, предлагаемая методика позволит оценить их эффективность и полноценно использовать электрические автомобили в регионах с холодным климатом.

### Литература

1. Ганова А. С., Хмелев Р. Н. Сравнительный анализ характерных тяговых аккумуляторов для современных электромобилей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 10. – С. 318–322. – EDN: BSCHJL.
2. Захаров Н. С., Сапоженков Н. О. Моделирование процессов формирования уровня заряженности автомобильных аккумуляторных батарей в зимний период // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 3 (51). – С. 232–237. – EDN: UFTPKB.
3. Тышкевич Л. Н., Журавский Б. В. Исследование тепловых процессов аккумуляторной батареи при эксплуатации автомобиля в условиях низких отрицательных температур // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2017. – № 6. – С. 71–77. – EDN: YNHMWJ.
4. Adermann J., Kreibich J., Lienkamp M. (2017) Experimental Study of Energy Consumption Variation in Recurring Driving Trips. *Journal of Electrical Engineering-elektrotechnicky*, Vol. 5, Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-Study-of-Energy-Consumption-Variation-Adermann-Kreibich/630dde9634b381068160f4b1c72396803ea316a4/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
5. Adhikari M., et al. (2020) Identification and Analysis of Barriers against Electric Vehicle Use, *Sustainability*, Vol. 12 (12), 4850, <https://doi.org/10.3390/su12124850> Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/12/4850/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
6. Aris A. M., Shabani B. (2017) An Experimental Study of a Lithium Ion Cell Operation at Low Temperature Conditions, *Energy Procedia* Vol. 110, pp. 128–135, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.117> Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217301479/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
7. Ayartürk H., et al. (2016) New Heating System Development Working with Waste Heat for Electric Vehicles, *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, pp. 1080–1086, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.178> Available at: [https://www.researchgate.net/publication/302966575\\_New\\_heating\\_system\\_development\\_working\\_with\\_waste\\_heat\\_for\\_electric\\_vehicles/](https://www.researchgate.net/publication/302966575_New_heating_system_development_working_with_waste_heat_for_electric_vehicles/) (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
8. Bonges H. A., Lusk A. C. (2016) Addressing electric vehicle (EV) sales and range anxiety through parking layout, policy and regulation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 83, pp. 63–73, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.011> Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856415002451/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
9. Ding Y., et al. (2019) Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. *Electrochemical Energy Reviews*, Vol. 2, pp. 1–28, <https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z> Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Automotive-Li-Ion-Batteries%3A-Current-Status-and-Ding-Cano/b35a16edcf9e0b983475cc470dbcd7feca3a9ac1/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
10. Dvorak D., Basciotti D., Gellai I. (2020) Demand-Based Control Design for Efficient Heat Pump Operation of Electric Vehicles, *Energies*, Vol. 13(2), 5440, <https://doi.org/10.3390/en13205440> Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/20/5440/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
11. Figenbaum E., Assum T., Kolbenstvedt M. (2015) Electromobility in Norway: Experiences and Opportunities. *Research in Transportation Economics*, Vol. 50, pp. 29–38, <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2015.06.004>. (In Eng.).
12. Ghaedi A., Mahmoudian M., Sedaghati R. (2022) The Impact of the Speed and Temperature Variation on the Electric Vehicles Reliability, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 2022, 4876218, <https://doi.org/10.1155/2022/4876218> (In Eng.).
13. Guo S., Liu Y., Li L. (2017) Study on the performance of lithium-ion batteries at different temperatures, in *Proceedings of the 2017 7th International Conference on Mechatronics, Computer and Education Informationization*. <https://doi.org/10.2991/mcei-17.2017.114> Available at: <https://www.atlantis-pess.com/proceedings/mcei-17/25887654/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
14. Habedank J. B., Krieglner J., Zaeh M. F. (2019) Enhanced Fast Charging and Reduced Lithium-Plating by Laser-Structured Anodes for Lithium-Ion Batteries, *Electrochem*, Vol. 166. N. 16, A3940, <https://doi.org/10.1149/2.1241915jes> Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.1241915jes/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
15. Horrein, L., et al. (2017) Impact of Heating System on the Range of an Electric Vehicle, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66. N. 6, pp. 4668–4677, <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2615095> Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Impact-of-Heating-System-on-the-Range-of-an-Vehicle-Horrein-Bouscayrol/1488ad1abb071483ab19899888947330b8ef2b16/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

16. Hu X., et al. (2020) Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 77, 100806, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806> Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128519301169/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

17. Iora P., Tribioli L. (2019) Effect of Ambient Temperature on Electric Vehicles' Energy Consumption and Range: Model Definition and Sensitivity Analysis Based on Nissan Leaf Data, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 10. Is. 1, <https://doi.org/10.3390/wevj10010002>. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/330251602\\_Effect\\_of\\_Ambient\\_Temperature\\_on\\_Electric\\_Vehicles'\\_Energy\\_Consumption\\_and\\_Range\\_Model\\_Definition\\_and\\_Sensitivity\\_Analysis\\_Based\\_on\\_Nissan\\_Leaf\\_Data/](https://www.researchgate.net/publication/330251602_Effect_of_Ambient_Temperature_on_Electric_Vehicles'_Energy_Consumption_and_Range_Model_Definition_and_Sensitivity_Analysis_Based_on_Nissan_Leaf_Data/) (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

18. Jaguemont J., Boulon L., Dubé Y. (2016) A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied Energy*, Vol. 164, pp. 99–114, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034>. (In Eng.).

19. Thompson I. D. (2018) *Modeling and exploring battery management strategies for use of LiCoO<sub>2</sub> lithium polymer cells in cold climates*, M.S. Thesis, University of Alaska Fairbanks. Available at: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/8746/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

20. Vandermeer J., Mueller-Stoffels M., Whitney E. (2017) An Alaska case study: Energy storage technologies, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Vol. 9 (6), 061708, <https://doi.org/10.1063/1.4986580> Available at: [https://www.researchgate.net/publication/321982257\\_An\\_Alaska\\_case\\_study\\_Energy\\_storage\\_technologies/](https://www.researchgate.net/publication/321982257_An_Alaska_case_study_Energy_storage_technologies/) (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

### References

1. Ganova, A. S., Hmelev, R. N. (2020) *Sravnitel'nyy analiz kharakternykh tyagovykh akkumulyatorov dlya sovremennykh elektromobiley* [Comparative analysis of characteristic traction batteries for modern electric vehicles]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-kharakteristik-tyagovykh-akkumulyatorov-dlya-sovremennykh-elektromobiley/viewer/> (accessed: 29.10.2022). (In Russ.).

2. Zaharov, N. S., Sapozhenkov, N. O. (2016) *Modelirovaniye protsessov formirovaniya urovnya zaryazhennosti avtomobil'nykh akkumulyatornykh batarey v zimniy period* [Modeling the processes of formation of the level of charge of car batteries in winter]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-protsessov-formirovaniya-urovnya-zaryazhennosti-avtomobilnykh-akkumulyatornykh-batarey-v-zimniy-period/viewer/> (accessed: 29.10.2022). (In Russ.).

3. Tyshkevich, L. N., Zhuravskij, B. V. (2017) *Issledovaniye teplovykh protsessov akkumulyatornoy batarei pri ekspluatatsii avtomobilya v usloviyakh nizkikh otritsatel'nykh temperatur* [Investigation of the thermal processes of the battery during the operation of the car in conditions of low negative temperatures]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-teplovykh-protsessov-akkumulyatornoy-batarei-pri-ekspluatatsii-avtomobilya-v-usloviyakh-nizkih-otritsatelnykh-temperatur/viewer/> (accessed: 29.10.2022). (In Russ.).

4. Adermann, J., Kreibich, J., Lienkamp, M. (2017) Experimental Study of Energy Consumption Variation in Recurring Driving Trips. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-Study-of-Energy-Consumption-Variation-Adermann-Kreibich/630dde9634b381068160f4b1c72396803ea316a4/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

5. Adhikari, M., et al. (2020) Identification and Analysis of Barriers against Electric Vehicle Use. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/12/4850/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

6. Aris, A. M., Shabani, B. (2017) An Experimental Study of a Lithium Ion Cell Operation at Low Temperature Conditions. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217301479/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

7. Ayartürk, H., et al. (2016) New Heating System Development Working with Waste Heat for Electric Vehicles. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/302966575\\_New\\_heating\\_system\\_development\\_working\\_with\\_waste\\_heat\\_for\\_electric\\_vehicles/](https://www.researchgate.net/publication/302966575_New_heating_system_development_working_with_waste_heat_for_electric_vehicles/) (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

8. Bonges, H. A., Lusk, A. C. (2016) Addressing electric vehicle (EV) sales and range anxiety through parking layout, policy and regulation. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856415002451/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

9. Ding, Y., et al. (2019) Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. *Electrochem. Energ.* Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Automotive-Li-Ion-Batteries%3A-Current-Status-and-Ding-Cano/b35a16edcf9e0b983475cc470dbcd7feca3a9ac1/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

10. Dvorak, D., Basciotti, D., Gellai, I. (2020) Demand-Based Control Design for Efficient Heat Pump Operation of Electric Vehicles. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/20/5440/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

11. Figenbaum, E., Assum, T., & Kolbenstvedt, M. (2015) Electromobility in Norway: Experiences and Opportunities. *Research in Transportation Economics*. Vol. 50, pp. 29–38. doi:10.1016/j.retrec.2015.06.004. (In Eng.).
12. Ghaedi, A. (2022) The Impact of the Speed and Temperature Variation on the Electric Vehicles Reliability. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/itees/2022/4876218/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
13. Guo, S., Liu, Y., Li, L. (2017) Study on the performance of lithium-ion batteries at different temperatures. In Proceedings of the 2017 7th International Conference on Mechatronics. *Computer and Education Informationization*. Available at: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/mcei-17/25887654/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
14. Habedank, J. B., Kriegler, J., Zaeh, M. F. (2019) Enhanced Fast Charging and Reduced Lithium-Plating by Laser-Structured Anodes for Lithium-Ion Batteries. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.1241915jes/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
15. Horrein, L., et al. (2017) Impact of Heating System on the Range of an Electric Vehicle. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Impact-of-Heating-System-on-the-Range-of-an-Vehicle-Horrein-Bouscayrol/1488ad1abb071483ab19899888947330b8ef2b16/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
16. Hu, X., et al. (2020) Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128519301169/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
17. Iora, P., Tribioli, L. (2019) Effect of Ambient Temperature on Electric Vehicles' Energy Consumption and Range: Model Definition and Sensitivity Analysis Based on Nissan Leaf Data. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/330251602\\_Effect\\_of\\_Ambient\\_Temperature\\_on\\_Electric\\_Vehicles'\\_Energy\\_Consumption\\_and\\_Range\\_Model\\_Definition\\_and\\_Sensitivity\\_Analysis\\_Based\\_on\\_Nissan\\_Leaf\\_Data/](https://www.researchgate.net/publication/330251602_Effect_of_Ambient_Temperature_on_Electric_Vehicles'_Energy_Consumption_and_Range_Model_Definition_and_Sensitivity_Analysis_Based_on_Nissan_Leaf_Data/) (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
18. Jaguemont, J., Boulon, L., & Dubé, Y. (2016) A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied Energy*, Vol. 164, pp. 99–114, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034>. (In Eng.).
19. Thompson, I. D. (2018) Modeling and exploring battery management strategies for use of LiCoO<sub>2</sub> lithium polymer cells in cold climates, M.S. Thesis, University of Alaska Fairbanks. Available at: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/8746/> (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).
20. Vandermeer J., Mueller-Stoffels M., Whitney, E. (2017) ACEP EVs in Alaska Survey. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/321982257\\_An\\_Alaska\\_case\\_study\\_Energy\\_storage\\_technologies/](https://www.researchgate.net/publication/321982257_An_Alaska_case_study_Energy_storage_technologies/) (accessed: 29.10.2022). (In Eng.).

#### **Информация об авторах:**

**Егор Евгеньевич Терентьев**, аспирант, научная специальность 2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: egor9843@gmail.com

**Игорь Михайлович Блянкинштейн**, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации транспортных средств, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: blyankinshtein@mail.ru

#### **Вклад соавторов:**

**Терентьев Е. Е.** – 80%,  
**Блянкинштейн И. М.** – 20%.

Статья поступила в редакцию: 22.11.2022; принята в печать: 08.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **Information about the authors:**

**Egor Evgenievich Terentyev**, postgraduate student, scientific specialty 2.9.5 Motor transport operation, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia  
e-mail: egor9843@gmail.com

**Igor Mikhailovich Blyankinstein**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical

Operation of Vehicles, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

e-mail: blyankinshtein@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Terentiev E. E.** – 80%,

**Blyankinshtein I. M.** – 20%.

The paper was submitted: 22.11.2022.

Accepted for publication: 08.02.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.