

Температурные показатели охлаждающих жидкостей для аккумуляторов электротракторов и электромобилей

Отари Назирович Дидманидзе,
академик РАН, доктор технических наук, профессор,
e-mail: didmanidze@rgau-msha.ru;

Екатерина Петровна Парлюк,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: kparlyuk@rgau-msha.ru;

Александр Игоревич Сучков,
соискатель на ученую степень
кандидата технических наук,
e-mail: suchkov_ai@yandex.ru;

Александр Вячеславович Бугаев,
кандидат технических наук, доцент кафедры,
e-mail: a.bugaev@rgau-msha.ru;

Николай Николаевич Пуляев,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: pulyaev@rgau-msha.ru;

Артёмбек Сергеевич Гузалов,
кандидат технических наук, доцент кафедры,
e-mail: guzalov@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим тенденцию перехода в мировом сельском хозяйстве на более экономичные и экологичные электромобильные средства в связи с ростом цен на топлива и горюче-смазочные материалы. Широкое применение электромобильных средств для выполнения сельскохозяйственных работ ограничивается такими факторами, как производительность, стоимость, срок службы и безопасность тяговых батарей. Система управления температурным режимом батареи играет ключевую роль в контроле продолжительности ресурса батареи. *(Цель исследования)* Проанализировать современные системы охлаждения электрических аккумуляторов, определить тип охлаждающей жидкости, способной поддерживать оптимальную температуру тяговой батареи в любых климатических условиях. *(Материалы и методы)* Рассмотрены системы и методы охлаждения, используемые в управления температурным режимом батареи. Представлен теоретический анализ эффективности терморегулирования тяговых батарей, т.е. возможности повышения производительности аккумулятора за счет поддержания температуры батареи на требуемом уровне. Для сравнения выбраны несколько брендов электромобилей мировых автопроизводителей. *(Результаты и обсуждение)* Наиболее важным требованием к эффективной системе охлаждения является быстрый отвод тепла, когда батарея нагрета и при запуске система охлаждения должна работать медленно, чтобы не снижать эффективность электромобиля. На основании этого критерия представлены статистические данные режимов и условий работы тяговых батарей и их оптимальный диапазон рабочих температур. Выполнены расчеты для трех типов охлаждающих жидкостей: аммиака, этиленгликоля и фреона R134a. *(Выводы)* Хотя выходная температура этиленгликоля составляет 22,2 градуса Цельсия, выше на 3,3 градуса, чем у аммиака, и на 0,5 градуса выше, чем у тетрафторэтана, этот хладагент подходит для использования в медных трубках.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, электротракторы, электромобили, система охлаждения, тяговые аккумуляторные батареи, производительность аккумулятора, охлаждающая жидкость.

■ **Для цитирования:** Дидманидзе О.Н., Парлюк Е.П., Сучков А.И., Бугаев А.В., Пуляев Н.Н., Гузалов А.С. Температурные показатели охлаждающих жидкостей для аккумуляторов электротракторов и электромобилей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №4. С. 55-61. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-55-61. EDN: SPTZND.

Coolant Temperature Indicators for Batteries in Electric Tractors and Vehicles

Otari N. Didmanidze,
member of the Russian Academy of Sciences,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: didmanidze@rgau-msha.ru;

Ekaterina P. Parlyuk,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: kparlyuk@rgau-msha.ru;

Alexander I. Suchkov,
Ph.D. applicant,
e-mail: suchkov_ai@yandex.ru;

Alexander V. Bugaev,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: a.bugaev@rgau-msha.ru;

Nikolay N. Pulyaev,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: pulyaev@rgau-msha.ru;

Artembek S. Guzalov,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: guzalov@rgau-msha.ru

Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper accentuates a noticeable shift toward more economical and environmentally friendly electric vehicles within global agriculture, prompted by the growing prices of fuels and lubricants. The widespread adoption of electric vehicles for agricultural tasks encounters limitations, including such factors as performance, cost, service life and safety of traction batteries. The battery thermal management system assumes a key role in regulating battery life. (*Research purpose*) The study aims to analyze contemporary cooling systems for electric batteries, to identify the type of coolant capable of sustaining the optimal temperature of the traction battery under diverse climatic conditions. (*Materials and methods*) The paper examines the cooling systems and methods employed for battery temperature control. It provides a theoretical analysis of the effectiveness of thermal regulation for traction batteries, specifically exploring the potential to enhance battery performance through the maintenance of temperature at the required level. To facilitate comparison, several brands of electric vehicles from global automakers were selected. (*Results and discussion*) The paramount criterion for an effective cooling system is its capacity to rapidly dissipate heat during periods of elevated battery temperature while operating at a gradual pace during startup, thereby ensuring minimal impact on the efficiency of the electric vehicle. Based on this criterion, the paper provides statistical data regarding the modes and operating conditions of traction batteries, including their optimal operating temperature range. Calculations were conducted for three coolant types: ammonia, ethylene glycol and freon R134a. (*Conclusions*) Despite having an outlet temperature of 22.2 degrees Celsius, ethylene glycol registers 3.3 degrees higher than ammonia and 0.5 degrees higher than tetrafluoroethane, this refrigerant is suitable for application in copper piping.

Keywords: agricultural machinery, electric tractors, electric vehicles, cooling system, traction batteries, battery performance, coolant.

For citation: Didmanidze O.N., Parlyuk E.P., Suchkov A.I., Bugaev A.V., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Temperaturnyye pokazateli okhlazhdayushchikh zhidkostey dlya akkumulyatorov elektrotraktorov i elektromobiley [Coolant temperature indicators for batteries in electric tractors and vehicles]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N4. 55-61 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-55-61. EDN: SPTZND.

Применение производственных и транспортных средств электромобильной техники для решения задач в сельскохозяйственной сфере становится все более актуальным. Современные электромобили и электротракторы пригодны для выполнения не только сельскохозяйственных работ, но и различных технологических операций. Наряду с уборочными работами их можно использовать для доставки сельскохозяйственной продукции, что может значительно улучшить логистику. Также электромобили эффективны в пригородных хозяйствах, где приходится часто перемещаться между городом и фермой. Сферы применения электромобилей в агросекторе продолжают расширяться [1]. Важным является экологичность электромобилей и отсутствие выбросов вредных веществ в окружающую среду и воздух [2]. Кроме того, электричество может генерироваться из возобновляемых источников энергии.

В большинстве случаев в электромобилях используют свинцово-кислотные или литий-ионные аккумуляторы. Для зарядки литий-ионных аккумуляторов требуется меньше времени, чем свинцово-кислотных. При непрерывной, длительной работе электромобиля под солнцем увеличивается внутреннее тепловыделение и повышается температура системы

аккумуляторной батареи, что приводит к снижению производительности, сбою, а небольшое изменение схемы подключения – к короткому замыканию. Из-за нагревания потребляется больше энергии, меньше пробег на одном заряде, увеличивается время зарядки, сокращаются сроки службы и емкость батареи, снижается потенциальная экономичность.

Цель исследования – проанализировать современные системы охлаждения тяговых батарей электромобилей, определить тип охлаждающей жидкости, которая способна поддерживать оптимальную температуру батареи в любых климатических условиях эксплуатации.

Материалы и методы. Во время работы температура аккумуляторов должна оставаться в допустимых пределах. Соблюдение этого условия имеет решающее влияние на долговечность и производительность батареи. Аккумуляторы предназначены для работы в диапазоне температуры окружающей среды от 68 до 77°F (от 20 до 25°C). В рабочем режиме они могут выдерживать температуру от –30 до +50°C, а при зарядке – от 0 до +50°C. При температуре 70-100°C возникает риск неконтролируемого тепловыделения, происходит цепная реакция и физическое разрушение структуры аккумуляторов.

В случае быстрой зарядки и прохождения через аккумулятор большого тока выделяется избыточное тепло, которое нужно отводить во избежание перегрева батареи. При слишком низкой температуре аккумулятор, наоборот, следует разогревать. Например, аккумуляторы нельзя заряжать, если температура ниже 0°C [3]. В некоторых моделях для достижения высокой производительности такие автомобильные компании, как *Tesla*, *KIA*, *BMW*, предлагают предварительно нагревать аккумулятор, разгоняя скорость от 0 до 100 км/ч менее, чем за 2 секунды.

Система охлаждения позволяет улучшить характеристики электромобиля и увеличить срок службы аккумуляторной батареи. Наиболее распространены системы с воздушным, жидкостным охлаждением и применением материала с фазовым переходом. Оптимальный диапазон рабочих температур для литий-ионных аккумуляторов составляет от 25 до 40°C [4].

В качестве среды, отводящей тепло, можно использовать воздух [5]. Данный способ осуществляется с помощью вентиляторов для увеличения воздушного потока над охлаждаемым объектом (рис. 1). Эта система используется в гибридных автомобилях *Toyota Prius* [6]. Аккумулятор охлаждается кондиционированным воздухом, который проходит над батареей и через нее. В автомобилях более поздних поколений применяется независимое воздушное охлаждение, и в такой системе предусмотрен испаритель. Хладагент при низкой температуре испаряется, поглощая тепло, а батарея охлаждается до более низкой температуры, чем в салоне.

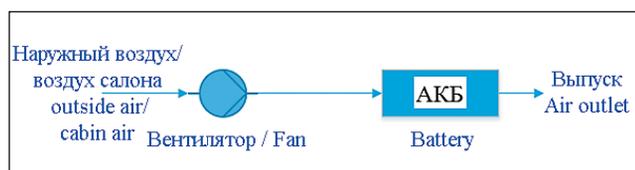


Рис. 1. Схема воздушного охлаждения [6]

Fig. 1. Air cooling system

При изучении вопросов эффективности воздушного охлаждения тяговых электробатарей выявлены теоретические и экспериментальные зависимости систем питания электро- и гибридных тягово-транспортных средств [7]. Проведены исследования воздушного охлаждения на основе интегральных схем (Патент RU 2780381 C1). Для этого применялись методы естественной, принудительной и смешанной конвекции охлаждения «горячих точек» в микросхемах блока управления аккумуляторных модулей. Однако в некоторых случаях к деталям внутри транспортных средств нет доступа охлаждающего воздуха [8].

В закрытой системе, когда внутрь батареи к деталям поступает меньший объем воздуха, при температуре окружающей среды более 35°C и высокой скорости отвода теплового потока предпочтительно жид-

костное охлаждение. Жидкости характеризуются высокими показателями теплопроводности и коэффициента теплопередачи, поэтому конструкция системы охлаждения достаточно простая [9]. Скорость потока жидкого хладагента можно увеличить и создать контур рециркуляции. Иногда в системах жидкостного охлаждения возникают проблемы: утечка, коррозия, лишний вес, конденсация и даже кавитация в трубках, по которым циркулирует хладагент [10].

К основным требованиям к охлаждающей жидкости относятся высокая удельная теплоемкость, низкая вязкость, высокая прозрачность при парообразовании, высокая температура кипения и низкая температура замерзания. Кроме этого жидкость не должна вызывать коррозию и воспламеняться [11].

Системы жидкостного охлаждения бывают прямого и непрямого типа, соответственно при наличии или отсутствии контакта компонентов [12]. В зависимости от того, выводится жидкость из контура охлаждения или после ее нагрева возвращается, различают замкнутые и разомкнутые системы. Горячая жидкость в замкнутом контуре системы охлаждается и рециркулирует.

С помощью термоэлектрических модулей электрическое напряжение может быть преобразовано в разность температур. Теплопередача происходит непосредственно за счет потребления электроэнергии. Этот способ называют также термоэлектрическим охлаждением (рис. 2), его можно использовать и для обогрева, если поменять местами полюса.

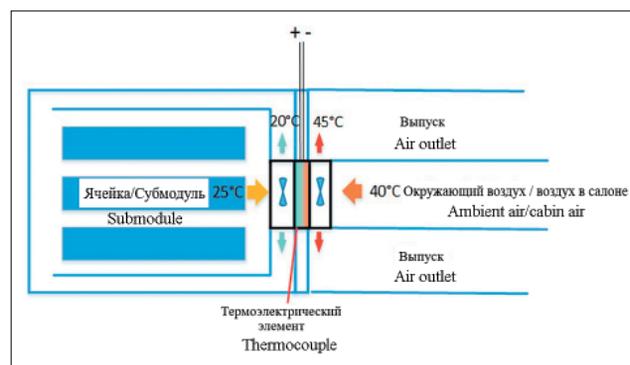


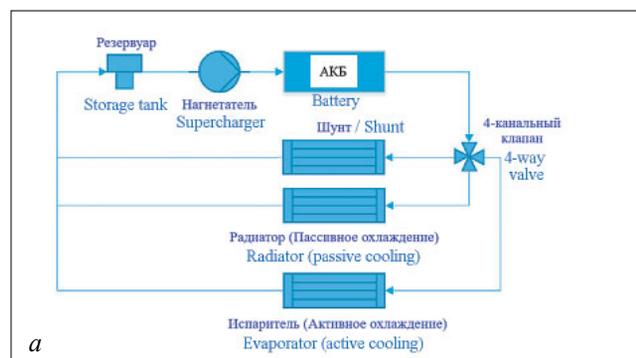
Рис. 2. Схема термоэлектрического охлаждения [12]

Fig. 2. Thermoelectric cooling system

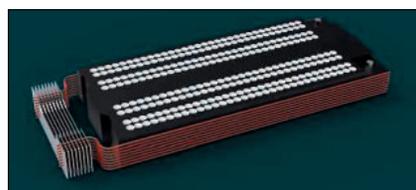
В холодных условиях эксплуатации электрохимические процессы замедляются, а общее внутреннее сопротивление увеличивается [13]. Из-за медленной инициализации запуск автомобиля затрудняется. Эту проблему можно решить путем внешнего обогрева модуля батареи с помощью электронагревателя либо внутреннего нагрева каждой ячейки подогретой терморегулирующей жидкостью [14].

Сегодня на рынке представлены технологии охлаждения, направленные на оптимизацию затрат и повышение производительности аккумуляторной

системы. Производители электромобилей после проведения обширного исследования предпочли комбинированную систему (рис. 3а), как наиболее эффективную концепцию контроля температуры батарей. В этой системе введен дополнительный элемент – шунт, который представляет собой оболочку из трубок капиллярно-сетной структуры со спеченным медным порошком (рис. 3б) [14]. Шунт используется в качестве испарителя, который во время работы поглощает тепло, рассеивает его в конденсаторе и снова переходит в жидкое агрегатное состояние.



а



б

Рис. 3. Комбинированная система охлаждения: а – общая схема; б – CAD-модель шунта [14]

Fig. 3. Combined cooling system: a – overview diagram; б – computer-aided design (CAD) model of the shunt [14]

Такая система имеет несколько рабочих режимов: обогрев, пассивное охлаждение и активное охлаждение. Пассивное охлаждение считается более предпочтительным, поскольку система отличается простой архитектурой и низким энергопотреблением. Материалом для шунта служит медь. Шунт выполняет функцию двухфазного устройства теплопередачи с высокой теплопроводностью.

Одним из направлений снижения металлоемкости узлов является применение полимерных материалов с металлическим оребрением, выдерживающих термические нагрузки. Как правило, эти материалы применяются для пассивного управления температурой и разрабатываются как альтернатива активному охлаждению. Преимущества полимерных материалов – более низкая стоимость, малый вес, устойчивость в агрессивных средах при поглощении такого же количества тепла, как традиционными материалами.

Проведены исследования по охлаждению интегральных схем, которые представляют собой блочно-модульную систему [15]. Силовые агрегаты

тягово-транспортных средств при различных нагрузках и режимах эксплуатации охлаждали методами естественного, принудительного и смешанного терморегулирования. Предложен способ определения термодинамических показателей блочно-модульной системы с использованием алгоритма, позволяющего определить теплоотдачу не только штатных радиаторов, но и изготовленных из полимерных материалов и с измененными конструктивными элементами. Это решение эффективно для многоуровневых контуров охлаждения, в связи с чем принятая методология применима и для аккумуляторных модулей.

Результаты и обсуждение. Система управления температурным режимом литий-ионного аккумулятора работает при температуре от 10 до 55°C. Для поддержания температуры использовали аммиак, этиленгликоль, фреон R134a (тетрафторэтан), воздух и воду. Для каждого вида охлаждающего агента рассчитывали температуру на выходе, чтобы оценить, какой из них обеспечит большее охлаждение батареи.

• Аммиак: удельная теплоемкость 2,2 кДж/(кг·К), плотность 0,73 кг/м³, скорость 0,15 м/с, тепловыделение батареи 230,72 Вт, температура жидкого аммиака $T_1 = 40^\circ\text{C}$, температура «горячей» жидкости 40°C.

Объемный расход (Q_{NH_3}) определяется произведением скорости и площади сечения трубки:

$$Q_{\text{NH}_3} = 0,15 \cdot (n \cdot d^2 / 4) = 0,15 \cdot \pi \cdot ((3,5 \cdot 10^{-3}) / 2)^2 = 6,80 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{с} \quad (1)$$

Массовый расход

$$\Delta Q_{\text{NH}_3} = Q_{\text{NH}_3} \cdot \rho_{\text{NH}_3} = (6,80 \cdot 10^{-5}) \cdot 0,73 = 4,46 \cdot 10^{-5} \text{ кг} / \text{с} \quad (2)$$

Из уравнения теплового баланса:

$$\Delta T_{\text{NH}_3} = \Delta Q_{\text{NH}_3} \cdot Cp \cdot dT; \quad (3)$$

$$\Delta T_{\text{NH}_3} = 230,72 = 4,46 \cdot 10^{-5} \cdot 2,2 \cdot (40 - T_2)$$

$$(40 - T_2) = 21,1^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 18,9^\circ\text{C}$$

Выходная температура аммиака $T_2 = 18,9^\circ\text{C}$.

• Фреон R134a (тетрафторэтан): удельная теплоемкость 1,44 кДж/(кг·К), плотность 4,25 кг/м³; скорость потока 1,4 м/с; тепловыделение батареи 230,72 Вт; температура жидкого тетрафторэтана $T_1 = 40^\circ\text{C}$; температура горячей жидкости 40°C.

Объемный расход

$$Q_{\text{R134a}} = 1,4 \cdot (n \cdot d^2 / 4) = 1,4 \cdot \pi \cdot ((3,5 \cdot 10^{-3})^2 / 4) = 1,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{с} \quad (4)$$

Массовый расход

$$\Delta Q_{\text{R134a}} = Q_{\text{R134a}} \cdot \rho_{\text{R134a}} = (1,34 \cdot 10^{-6}) \cdot 4,25 = 5,72 \cdot 10^{-5} \text{ кг} / \text{с} \quad (5)$$

Таблица						Table					
ТЕМПЕРАТУРА НА ВЫХОДЕ РАЗЛИЧНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ						OUTLET TEMPERATURE OF VARIOUS COOLANTS					
Охлаждающий агент	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) Specific heat capacity, kJ/(kg·K)	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Скорость потока, м/с Flow velocity, m/s	Температура, °C Temperature, °C							
				На входе Inlet	На выходе Outlet						
Воздух / Air	1005	1,165	13,8	40	28,11						
Вода / Water	4178	998,2	0,2	40	33,93						
Аммиак / Ammonia	2,2	0,73	0,15	40	18,9						
Этиленгликоль Ethylene glycol	2,47	1110,8	1,2	40	15,8						
Фреон R134a (тетрафторэтан) Freon R134a (tetrafluoroethane)	1,44	4,25	1,4	40	21,7						

Из уравнения теплового баланса:

$$\Delta T_{R134a} = \Delta Q_{R134a} \cdot C_p \cdot dT;$$

$$\Delta T_{R134a} = 230,72 = 5,72 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot (40 - T_2). \quad (6)$$

$$(40 - T_2) = 18,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 21,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Выходная температура фреона R134a = 21,7°C.

• Этиленгликоль (ЭГ): удельная теплоемкость 2,47 кДж/(кг·К), плотность 1110,8 кг/м³, скорость 1,2 м/с, тепловыделение батареи 230,72 Вт, температура жидкого этиленгликоля T₁ = 40°C, температура горячей жидкости 40°C, скорость 1,2 м/с.

Объемный расход

$$Q_{ЭГ} = 1,2 \cdot (n \cdot d^2 / 4) = 1,2 \cdot \pi \cdot ((3,5 \cdot 10^{-3})^2 / 4) =$$

$$= 5,30 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{с} \quad (7)$$

Массовый расход

$$\Delta Q_{ЭГ} = Q_{ЭГ} \cdot \rho_{ЭГ} = (5,30 \cdot 10^{-5}) \cdot 1110,8 =$$

$$= 0,059 \cdot 10^2 \text{ кДж/с} \quad (8)$$

Из уравнения теплового баланса:

$$\Delta T_{ЭГ} = \Delta Q_{ЭГ} \cdot C_p \cdot dT; \quad (9)$$

$$\Delta T_{ЭГ} = 230,72 = 0,059 \cdot 10^2 \cdot 2,48 \cdot (40 - T_2)$$

$$(40 - T_2) = 24,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 15,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Выходная температура этиленгликоля 15,8°C. Выходная температура воды, а также воздуха в качестве эталона приведены по [10, 11, 15]. Значения выходной температуры исследуемых охлаждающих жидкостей представлены в *таблице*.

Вода имеет более высокую температуру на выходе, чем другие хладагенты. Но использовать воду в качестве охлаждающей жидкости нецелесообразно, поскольку она более склонна вступать в реакцию с металлическими поверхностями, в частности медными трубками, и могут возникнуть серьезные проблемы. Как было отмечено ранее, воздух применяется в

системах охлаждения батареи, однако при высокой температуре окружающей среды это малоэффективно.

Использование аммиака в качестве хладагента тоже может вызвать проблемы из-за несовместимости с медью, его нельзя использовать в медных трубках, к тому же это токсичное вещество. Недостатком также является невозможность обнаружить утечки аммиака.

Температура фреона R134a на выходе более оптимальная, чем этиленгликоля, однако при нагревании фреона, как это требуется при работе электромобиля, образуется удушающий газ [16].

Таким образом, этиленгликоль действует как лучший среди рассматриваемых охлаждающих жидких агентов за счет самой низкой температуры на выходе и ряда других преимуществ. Наиболее важно то, что в составе этиленгликоля содержится антикоррозионное вещество, предотвращающее реакцию с металлической поверхностью. Этиленгликоль имеет низкую летучесть и высокую температуру кипения, его можно использовать зимой, так как он является охлаждающей жидкостью-антифризом, а также снижает возможность перегрева аккумулятора зимой.

Выводы. Обосновано применение электромобильных средств, в том числе электротракторов, для технологических и транспортных операций с точек зрения более низких затрат относительно затрат на топливо и ГСМ, обслуживания, экологических преимуществ.

Для терморегулирования тяговой аккумуляторной батареи электромобилей и электротракторов охлаждающая жидкость должна быть актуальной и доступной для применения в условиях агропроизводительной деятельности, а также максимально эффективно отводить тепло.

Сравнение и выбор наиболее приемлемого типа охлаждающих жидкостей, включая аммиак, этиленгликоль и фреон R134a, водяное и воздушное охлаждение, проведены по параметру температуры на выходе из терморегулирующей системы. Выходная температура этиленгликоля составляет 15,8°C, это ниже, чем аммиака на 3,4°C и фреона R134a (тетрафторэтана) на 6,2°C.

Этиленгликоль признается наиболее подходящим жидким хладагентом для использования, он рассеивает максимальное количество тепла. Этиленгликоль можно использовать как зимой, поскольку он обладает антифризными свойствами, так и в жарких условиях, чтобы избежать перегрева.

Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение 075-15-2023-220).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ртищева Н.Е., Пуляев Н.Н., Гузалов А.С. Электрический трактор: особенности конструкции и перспективы развития. *Journal of Agriculture and Environment*. 2022. N8(28). 15. DOI: 10.23649/jae.2022.28.8.015. EDN: WLGRU.
2. Inoyatkhodjaev Ja., Umerov F., Asanov S. Method for sizing an electric drive for small class electric vehicles. *Universum: технические науки*. 2023. N4-7(109). 33-39. DOI: 10.32743/UniTech.2023.109.4.15230. EDN: XDNGRA.
3. Bolshakov N.A., Didmanidze O.N., Parlyuk E.P. Modernization of the cooling system in tractors with gas engines. *E3S Web*. 2020. 04048. DOI: 10.1051/e3sconf/202022404048. EDN: YGUHBB.
4. Poddubko S.N., Ishin N.N., Goman A.M., et al. Methods for calculating the load of electric vehicle gearboxes using their dynamic models. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2022. N2(59). 16-23. DOI: 10.46864/1995-0470-2022-2-59-16-23. EDN: CCVDIV.
5. Usmanov U., Karimov A. Optimization based control strategies of hybrid electric vehicles. *Universum: технические науки*. 2023. N1-4(106). 50-55. EDN: UUIBKB.
6. Vlasenko N.A., Dusaeva A.I., Nikiforov I.V., Prelovskii D.S. Technique for automating charging of an electric vehicle based on a Raspberry Pi controller using neural networks. *Computing, Telecommunications and Control*. 2022. Vol. 15. N4. 37-50. DOI: 10.18721/JCSTCS.15403. EDN: GRSTAS.
7. Вахрушев М.А., Беляев Д.С., Генсон Е.М. Теоретическое исследование зависимости потребления электроэнергии электромобилем от внешних факторов // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2022. N4(62). С. 31-35. EDN: VQSSYC.
8. Karvinkoppa M.V., Hotta T. K. Role of PCM based minichannels for the cooling of multiple protruding IC chips on the SMPS board. *Journal of Energy Storage*. 2019. Vol. 26. 100917. DOI: 10.1016/j.est.2019.100917.
9. Терентьев Е.Е., Блянкинштейн И.М. Методика выбора типа аккумулятора для эксплуатации электромобилей в регионах с холодным климатом // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2023. N1. С. 112-124. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-1-112. EDN: FNKXAN.
10. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей // *Электричество*. 2016. N1. С. 55-65. EDN: VLKOSZ.
11. Асадов Д.Г. Диагностирование и определение остаточной емкости аккумуляторной батареи электромобиля // *Международный технико-экономический журнал*. 2011. N1. С. 122-127. EDN: NJJZLD.
12. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Пьянзин А.М. Проектирование электромобиля-трайка на базе параметрических САД/CAE-моделей // *Инженерные технологии и системы*. 2020. Т. 30. N3. С. 464-479. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.464-479. EDN: FJFJTD.
13. Lazarenko O., Loik V., Shtain B. Research on the fire hazards of cells in electric car batteries. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. 2018. Vol. 52. N4. 108-117. DOI: 10.12845/bitp.52.4.2018.7. EDN: TLIFJT.
14. Maljković M., Stamenković D., Blagojević I., Popović V. The analysis of available data on energy efficiency of electric vehicles to be used for eco-driving project development. *Science and Technique*. 2019. Vol. 18. N6. 504-508. DOI: 10.21122/2227-1031-7448-2019-18-6-504-508. EDN: LPAWPS.
15. Bozhkov S., Mutafchiev M., Milenov I., et al. Method for determination of the hybrid electric vehicle energy efficiency in urban transportation. *Vestnik NovSU*. 2019. N 4(116). 4-8. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.4(116). 4-8. EDN: FKSMML.
16. Dorofeev R., Tumasov A., Sizov A., et al. Engineering of light electric commercial vehicle. *Science and Technique*. 2020. Vol. 19. N1. 63-75. DOI: 10.21122/2227-1031-2020-19-1-63-75. EDN: SYNXIP.

REFERENCES

1. Rtishcheva N.E., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Elektricheskiy traktor: osobennosti konstruktssii i perspektivy razvitiya [Electric tractor: design specifics and development prospects]. *Journal of Agriculture and Environment*. 2022. N8(28). 5 (In Russian). DOI: 10.23649/jae.2022.28.8.015. EDN: WLGRU.
2. Inoyatkhodjaev Ja., Umerov F., Asanov S. Method for sizing an electric drive for small class electric vehicles. *Universum: Tekhnicheskiye nauki*. 2023. N4-7(109). 33-39 (In English). DOI: 10.32743/UniTech.2023.109.4.15230. EDN: XDNGRA.
3. Bolshakov N.A., Didmanidze O.N., Parlyuk E.P. Modernization of the cooling system in tractors with gas engines. *E3S Web*. 2020. (In English). DOI: 10.1051/e3sconf/202022404048. EDN: YGUHBB.
4. Poddubko S.N., Ishin N.N., Goman A.M., et al. Methods for calculating the load of electric vehicle gearboxes using their dynamic models. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2022. N2(59). 16-23 (In English). DOI: 10.46864/1995-0470-2022-2-59-16-23. EDN: CCVDIV.

- 10.46864/1995-0470-2022-2-59-16-23. EDN: CCVDIV.
5. Usmanov U., Karimov A. Optimization based control strategies of hybrid electric vehicles. *Universum: Tekhnicheskiye nauki*. 2023. N1-4(106). 50-55 (In English). EDN: UUJBKB.
 6. Vlasenko N.A., Dusaeva A.I., Nikiforov I.V., Prelovskii D.S. Technique for automating charging of an electric vehicle based on a Raspberry Pi controller using neural networks. *Computing, Telecommunications and Control*. 2022. Vol. 15. N4. 37-50 (In English). DOI: 10.18721/JCSTCS.15403. EDN: GRSTAS.
 7. Vakhrushev M.A., Belyaev D.S., Genson E.M. Teoreticheskoe issledovanie zavisimosti potrebleniya elektroenergii elektromobilem ot vneshnikh faktorov [Theoretical study of the dependence of electric vehicle electricity consumption on external factors]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2022. N4(62). 31-35 (In Russian). EDN: VQSSYC.
 8. Karvinkoppa M.V., Hotta T.K. Role of PCM based minichannels for the cooling of multiple protruding IC chips on the SMPS board. *Journal of Energy Storage*. Dec. 2019. Vol. 26. 100917 (In English). DOI: 10.1016/j.est.2019.100917.
 9. Terentiev E.E., Blyankinshtein I.M. Metodika vybora tipa akkumulyatora dlya ekspluatsii elektromobiley v regionakh s kholodnym klimatom [Methodology for selecting the type of battery for operation of electric vehicles in cold regions]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2023. N1. 112-124 (In Russian). DOI: 10.25198/2077-7175-2023-1-112. EDN: FNKXAN.
 10. Shumov Yu.N., Safonov A.S. Energosberegayushchie elektricheskiye mashiny dlya privoda elektromobiley i gibridnykh avtomobiley [Energy-saving electrical machines for driving electric and hybrid vehicles]. *Elektrichestvo*. 2016. N1. 55-65 (In Russian). EDN: VLKOSZ.
 11. Asadov D.G. Diagnostirovanie i opredelenie ostatochnoy emkosti akkumulyatornoy batarei elektromobilya [Diagnosis and determination of the residual capacity of an electric vehicle battery]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal*. 2011. N1. 122-127 (In Russian). EDN: NJIZLD.
 12. Chugunov M.V., Polunina I.N., Pjanzin A.M. Proektirovanie elektromobilya-trayka na baze parametricheskikh CAD/CAE-modeley [E-Tricycle vehicle design based on parametric CAD/CAE models]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*. 2020. Vol. 30. N3. 464-479 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.464-479. EDN: FJFJTD.
 13. Lazarenko O., Loik V., Shtain B. Research on the fire hazards of cells in electric car batteries. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. 2018. Vol. 52. N4. 108-117 (In English). DOI: 10.12845/bitp.52.4.2018.7. EDN: TLIFJT.
 14. Maljković M., Stamenković D., Blagojević I., Popović V. The analysis of available data on energy efficiency of electric vehicles to be used for eco-driving project development. *Science and Technique*. 2019. Vol. 18. N6. 504-508 (In English). DOI: 10.21122/2227-1031-7448-2019-18-6-504-508. EDN: LPAWPS.
 15. Bozhkov S., Mutafchiev M., Milenov I., et al. Method for determination of the hybrid electric vehicle energy efficiency in urban transportation. *Vestnik NovSU*. 2019. N 4(116). 4-8 (In English). DOI: 10.34680/2076-8052.2019.4(116). 4-8. EDN: FKSMMM.
 16. Dorofeev R., Tumasov A., Sizov A., et al. Engineering of light electric commercial vehicle. *Science and Technique*. 2020. Vol. 19. N1. 63-75 (In English). DOI: 10.21122/2227-1031-2020-19-1-63-75. EDN: SYNXIP.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

All authors contributed equally to this publication.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

03.10.2023
20.11.2023