УДК 621.43

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-4-145-150

© Д. В. Терзи, адъюнкт

© D. V. Terzi, adjunct

(Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии

(Branch of the Military Academy of Material and Technical Support Named after General of the Army

А. В. Хрулева МО РФ в г. Омске)

A. V. Khrulev MD RF in Omsk)

E-mail: terzi.dmitry@yandex.ru

E-mail: terzi.dmitry@yandex.ru

ИНДУКЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

INDUCTION MAINTENANCE OF THE ENGINE HEAT ACCUMULATOR WORKING CAPACITY IN CONDITIONS OF NEGATIVE TEMPERATURES

Представлена конструкция теплового аккумулятора фазового перехода с индукционным устройством электроподогрева, обмотка которого равномерно расположена на поверхности аккумулятора, что обеспечивает быстрый и равномерный нагрев цилиндрических капсул теплоаккумулирующего материала с минимальными затратами электроэнергии. Данный тепловой аккумулятор рационально применять в системах охлаждения поршневых двигателей для повышения пусковой надежности в условиях отрицательных температур холодного климата.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор фазового перехода с индукционным устройством электроподогрева, обмотка индукционного устройства электроподогрева, электромагнитное поле, предпусковой подогрев двигателя.

The article presents the design of a thermal battery of phase transition with inductive electric heating device, the winding of which is evenly positioned on the surface of the battery, which ensures fast and uniform heating of cylindrical capsules of heat-accumulating material with minimal energy consumption. It is rational to use this thermal battery in the cooling system of piston engines to increase the starting reliability in conditions of negative temperatures of the cold climate.

Keywords: thermal accumulator of phase transition with induction electric heating device, winding of induction electric heating device, electromagnetic field, engine start heating.

Во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 8 февраля 2013 года № 50 образована Государственная комиссия по вопросам развития Арктики. Государственная программа «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2025 года» (далее — госпрограмма) утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 года № 366¹. Госпрограмма является основным механизмом реализации стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности.

¹ Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2025 года»: Постановление Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366.

Цель госпрограммы — повышение уровня социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации.

Госпрограмма включает три подпрограммы:

- формирование опорных зон развития и обеспечение их функционирования, создание условий для ускоренного социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации;
- развитие Северного морского пути и обеспечение судоходства в Арктике;
- создание оборудования и технологий нефтегазового и промышленного машиностроения, необходимых для освоения минерально-сырьевых ресурсов Арктической зоны Российской Федерации.

Задачи госпрограммы:

- повышение качества жизни и защищенности населения, проживающего на территории Арктической зоны;
- создание условий для развития Северного морского пути в качестве национальной транспортной магистрали России в Арктике и развитие системы гидрометеорологического обеспечения мореплавания в его акватории;
- развитие науки, технологий и повышение эффективности использования ресурсной базы Арктической зоны и континентального шельфа Российской Федерации в Арктике;
- создание опережающего научно-технического потенциала и технологий для производства перспективной техники и развития электронной компонентной базы для решения задач в области социально-экономического развития Арктической зоны.

Реализация госпрограммы позволит создать условия для ускоренного социально-экономического развития Арктической зоны, достижения стратегических интересов и обеспечения национальной безопасности России в Арктике [1].

Выполнение настоящей госпрограммы невозможно без применения передовых технологий. Экстремальные климатические условия Арктического региона создают комплекс проблем в области эксплуатации дорожных строительных и транспортных машин. Влияние низких температур на их техническое состояние исследовано в работах таких известных ученых, как Резник Л. Г., Семенов Н. В., Кох П. И., Энглин Б. А., Непогодьев А. В., Главати О. Л., Крамаренко Г. В. Низкие температуры оказывают негативное воздействие на надежность работы всех механизмов и систем, снижают жизненный цикл техники.

Частью комплекса проблемных вопросов является вопрос обеспечения надежности пуска двигателя. Последняя непосредственно связана с экологической составляющей эксплуатации. Необходимость защиты окружающей среды от воздействия вредных выбросов — приоритетная задача. В рамках решения проблемы низкой надежности пуска существует практика круглосуточной работы двигателей. Проблема облегчения пуска в условиях отрицательных температур широко известна. В настоящее время ведутся по-

иски новых путей повышения надежности пуска двигателей техники, эксплуатируемой в условиях отрицательных температур. Решение настоящей проблемы осуществляется в двух направлениях:

- обеспечение необходимой пусковой частоты вращения коленчатого вала;
- повышение воспламеняемости топливовоздушной смеси [2].

Комплекс мероприятий, обеспечивающих надежный пуск двигателя в условиях отрицательных температур, схематично представлен на рис. 1 [3].

Несмотря на длительный период исследований, нет единого подхода к решению настоящего проблемного вопроса. Имеется комплекс технических средств облегчения пуска двигателей, у каждого из которых есть свои достоинства и недостатки [4, 5]. Далеко не все предприятия, эксплуатирующие технику в Арктической зоне, обеспечены технологическим оборудованием для осуществления предпусковой подготовки двигателя.

Один из кардинальных путей решения данной проблемы — использование в качестве источника энергии устройства, способного накапливать и хранить тепловую энергию, выделяемую двигателем. Такие устройства получили название «тепловые аккумуляторы». Из известных типов тепловых аккумуляторов для предпускового подогрева двигателей наиболее приемлем тепловой аккумулятор фазового перехода первого рода «плавление–кристаллизация» с тепловым эффектом — выделением или поглощением теплоты фазового перехода [6, 7].

При анализе научных исследований в этой области вызывает интерес патент № 2187049 (МПК F24H 7/00, РФ) на тепловой аккумулятор фазового перехода. Конструктивно этот аккумулятор состоит из теплоизолированного цилиндрического корпуса, съемной крышки, входного и выходного отверстий. В эти отверстия запрессованы впускная и выпускная трубы. Внутри корпуса находится теплообменник, состоящий из коаксиально расположенных цилиндрических капсул, заполненных теплоаккумулирующим материалом (ТАМ). Теплообменник монтируется на съемной крышке при помощи болтового соединения и крепится к корпусу [8].

Рис. 1. Пути обеспечения надежности пуска двигателя в условиях отрицательных температур

Недостаток данного изобретения — отсутствие возможности поддержания стабильной температуры теплоносителя в течение длительного периода покоящегося двигателя в условиях отрицательных температур.

С учетом указанного недостатка в 2014 году зарегистрирован патент № 2506503 (МКИ 7 F24H 7/00, РФ) на тепловой аккумулятор фазового перехода с устройством электроподогрева, где в качестве нагревательных элементов применяются позисторы.

Позисторы — это разновидность резисторов, полупроводниковых элементов, изготовленных на основе керамики и характеризующихся положительным температурным коэффициентом сопротивления. Позисторная керамика обладает свойством керамики создавать интенсивное тепловое излучение, имеет высокую прочность и долговечность [9]. Недостаток саморегулирующихся нагревательных элементов на позисторной керамике — локальный нагрев в месте его установки и их низкая эффективность, не позволяющая обеспечить быстрый и равномерный нагрев цилиндрических капсул с ТАМ. Кроме

того, высокая потребность в электроэнергии может снизить работоспособность аккумуляторных батарей в условиях автономного запуска. Как известно, при отрицательных температурах наблюдается значительное снижение энергетических возможностей аккумуляторных батарей, особенно в пусковых режимах, что значительно снижает надежность пуска двигателя [10].

Обеспечение эффективного и равномерного нагрева ТАМ с минимальными затратами электроэнергии и возможностью применения бортовых источников питания — приоритетная задача в рамках развития современных теплоаккумулирующих средств [11].

Решение настоящей задачи видится в применении индукционного устройства электроподогрева. Нагрев осуществляется за счет генерации токов высокой частоты (вихревых токов Фуко) в материале цилиндрических капсул с ТАМ, помещенных внутрь индуктора. Сам индуктор представляет собой катушку, внутри которой создается переменное магнитное поле. Катушка не имеет сердечника, вместо него используются

разогреваемые элементы — капсулы с теплоаккумулирующим материалом [12].

Установка индукционного устройства электроподогрева обеспечит эффективный и равномерный нагрев теплоаккумулирующего материала, повысит экономичность технологической операции, снизит токсичность выбросов отработанных газов в период прогрева двигателя [13]. На рис. 2 представлена схема теплового аккумулятора фазового перехода с индукционным устройством электроподогрева.

Указанный аккумулятор фазового перехода с индукционным устройством электроподогрева содержит наружный корпус из диэлектрического материала 1 и отделенный от него тепловой изоляцией 2 внутренний корпус из диэлектрического материала 3, внутри которого размещены металлические цилиндрические капсулы с ТАМ 4, разобщенные щелевыми зазорами 5. В торцевой части расположены входной патрубок 6 и выходной патрубок 7, крышка из диэлектрического материала 8, на которой находится ввод электропитания 9, присоединенный болтовым соединением 10 к наружному корпусу 1, по поверхности которого равномерно располагается обмотка индукционного устройства электроподогрева.

Работает аккумулятор следующим образом. Накопление тепловым аккумулятором фазового перехода тепловой энергии осуществляется при работе двигателя за счет теплообмена его теплоносителя с металлическими цилиндрическими капсулами с ТАМ. Теплоноситель подводится через входной патрубок 6, проходит через щелевые зазоры 5 и отводится через выходной патрубок 7. При этом ТАМ нагревается в твердой фазе до температуры плавления, плавится, а затем нагревается в жидкой фазе до температуры, при которой наступает тепловое равновесие между ним и теплоносителем.

При длительном периоде покоя двигателя тепловой аккумулятор разряжается и требует тепловой поддержки. Тепловая поддержка может осуществляться за счет подачи кратковременных импульсов тока через ввод электропитания 10 (от аккумуляторных батарей или внешнего источника электрического тока) на обмотку индукционного устройства электроподогрева 11. Данная обмотка создает переменное электромагнитное поле, индуцирующее в металлических цилиндрических капсулах с ТАМ вихревые токи Фуко, за счет которых и осуществляется индукционный нагрев [14].

Рис. 2. Тепловой аккумулятор фазового перехода с индукционным устройством электроподогрева: 1 — наружный корпус из диэлектрического материала; 2 — тепловая изоляция; 3 — внутренний корпус из диэлектрического материала; 4 — металлические цилиндрические капсулы с теплоаккумулирующим веществом; 5 — щелевые зазоры; 6 — входной патрубок; 7 — выходной патрубок; 8 — крышка из диэлектрического материала; 9 — ввод электропитания; 10 — болтовое соединение; 11 — обмотка индукционного устройства электроподогрева

Индукционный нагрев — это нагрев при бесконтактной передаче энергии в нагреваемое электропроводящее тело с помощью переменного электромагнитного поля, создаваемого индуктором.

Главное отличие индукционного нагрева от нагрева внешними источниками тепла — выделение тепловой энергии в самом нагреваемом объекте. При индукционном нагреве появляется возможность большой концентрации тепловой энергии в небольшом объеме нагреваемого объекта, что позволяет активно осуществлять нагрев ТАМ.

В основе индукционного нагрева лежат электромагнитная индукция, описываемая законом Фарадея–Ленца, и тепловое действие электрического тока, которое отражает закон Джоуля–Ленца.

При подаче тока на обмотку индуктора переменное магнитное поле благодаря электромагнитной индукции создает в пространстве, где расположены цилиндрические капсулы с ТАМ, вихревое электрическое поле напряженностью E , которое порождает электродвижущую силу (ЭДС) индукции, определяемую законом Фарадея–Ленца:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где Φ — магнитный поток, равный произведению магнитной индукции B на площадь сечения S , перпендикулярного силовым линиям магнитного поля ($B\vec{S}$); t — время, с; N — число витков обмотки индуктора.

Под воздействием ЭДС электроны материала цилиндрической капсулы приходят в движение, создавая электрический ток (вихревой ток Фуко), в результате чего материал капсулы нагревается. Количество выделяемой теплоты может быть определено из закона Джоуля–Ленца в дифференциальной форме:

$$q_v = \frac{E^2}{\rho}, \quad (2)$$

где q_v — интенсивность объемного тепловыделения, Дж/м³; E — напряженность электрического поля, В/м; ρ — удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·м.

При расчете сопротивления цилиндрических и овальных индукторов, внутрь которых помещено нагреваемое изделие, можно принять, что ток сконцентрирован лишь на внутренней стороне провода. Усиление магнитного поля внутри индуктора в соединении с эффектом близости

повышает эффективность нагрева деталей, охваченных индуктором [15].

Выводы и заключение

1. Определено, что индукционное устройство электроподогрева, включенное в конструкцию теплового аккумулятора фазового перехода обеспечивает быстрый и равномерный нагрев цилиндрических капсул теплоаккумулирующего материала с минимальными затратами электроэнергии.

2. Описанный тепловой аккумулятор фазового перехода с индукционным устройством электроподогрева рационально применять в системах охлаждения поршневых двигателей для повышения пусковой надежности в условиях отрицательных температур холодного климата.

3. Внедрение теплового аккумулятора фазового перехода с индукционным устройством электроподогрева в практику эксплуатации техники способствует реализации программы социально-экономического развития Арктической зоны, достижения стратегических интересов и обеспечения национальной безопасности России в Арктике.

Библиографический список

1. Маслобоев А. В. Исследование и разработка моделей и методов информационной поддержки управления региональной безопасностью (на примере Мурманской области): дис. ... д-ра техн. наук. Апатиты, 2016. 314 с.
2. Семенов Н. В. Эксплуатация автомобилей в условиях отрицательных температур. М. : Транспорт, 2013. 190 с.
3. Косенков И. А. Совершенствование системы предпусковой тепловой подготовки тракторных дизелей путем использования аккумулированной энергии: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 166 с.
4. Крамаренко Г. В., Николаев В. А., Шаталов А. И. Безгаражное хранение автомобилей при низких температурах. М. : Транспорт, 2004. 136 с.
5. Берестнев Г. А. Обеспечение стабилизации температуры надувочного воздуха в комбинированных двигателях путем применения теплового аккумулятора: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2006. 143 с.
6. Шульгин В. В. Теория и практика применения в автотранспортных средствах тепловых аккумуляторов фазового перехода: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2005. 361 с.
7. Dincer I., Rosen M. A. Thermal energy storage: systems and applications. University of Ontario, Canada. 2011. 648 p.

8. Пат. 2187049 С1 Российская Федерация, МПК F24Н 7/00. Тепловой аккумулятор фазового перехода / Шульгин В. В., Гулин С. Д., Никифоров Г. И., Кинев Ю. Г., Крапивко О. В., Золотарев Г. М. № 2000132463/06; заявл. 25.12.2000; опубл. 10.08.12, Бюл. № 22.

9. Пат. 2506503 С1 Российская Федерация, МКИ 7 F24Н 7/00: Тепловой аккумулятор фазового перехода с саморегулируемым устройством электроподогрева / Бублий С. А., Бублий И. А., Савчук С. В., Котровская И. О., Котровский А. В., Котровский А. А., Фролов А. Л. № 2012145181/06; заявл. 24.10.12; опубл. 10.02.14, Бюл. № 4.

10. Левенберг В. Д. Аккумуляирование тепла. М.: Наука, 2011. 83 с.

11. Сидоренко В. Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении. СПб.: Машиностроение, 2010. 230 с.

12. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 2013. 463 с.

13. Саламатин М. А. Комбинированная система защиты энергетической установки тепловоза в условиях низких температур: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2012. 126 с.

14. Пат. 189233 U1 Российская Федерация, МПК F24Н 7/02: Тепловой аккумулятор фазового перехода с индукционным устройством электроподогрева / Шабалин Д. В., Терзи Д. В., Алтухов Я. В., Касай С. А., Агафонов Д. С. № 2018141661; заявл. 26.11.18; опубл. 16.05.19. Бюл. № 14.

15. Бабаев Б. Д. Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников с фазопереходным аккумулярованием тепла: дис. ... д-ра техн. наук. Махачкала, 2016. 345 с.

References

1. Masloboev A. V. *Issledovanie i razrabotka modeley i metodov informatsionnoy podderzhki upravleniya regional'noy bezopasnost'yu (na primere Murmanskoy oblasti)*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Research and development of models and methods of information support of regional security management (on the example of the Murmansk region). Dr. Sci. Tech. diss.]. Apatity, 2016, 314 p.

2. Seimyonov N. V. *Ehkspluatatsiya avtomobiley v usloviyakh otritsatel'nykh temperature* [Operation of vehicles in conditions of negative temperatures]. Moscow, Transport Publ., 2013, 190 p.

3. Kosenkov I. A. *Sovershenstvovanie sistemy predpuskovoy teplovoy podgotovki traktornykh dizeley putem ispol'zovaniya akkumulirovannoy ehnergii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the system of pre-start heat treatment of tractor diesel engines by using the accumulated energy. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2011, 166 p.

4. Kramarenko G. V., Nikolaev V. A., Shatalov A. I. *Bezgarazhnoe khranenie avtomobiley pri nizkikh temperaturakh* [Open-air parking of cars at low temperatures]. Moscow, Transport Publ., 2004, 136 p.

5. Berestnev G. A. *Obespechenie stabilizatsii temperatury naduvochnogo vozdukha v kombinirovannykh dvigatelyakh putem primeneniya teplovogo akkumulyatora*. Diss. kand. tekhn. nauk [Stabilization of inflatable air temperature in combined engines by using the heat accumulator. PhD in Sci. Tech. diss.]. Chelyabinsk, 2006, 143 p.

6. Shul'gin V. V. *Teoriya i praktika primeneniya v avtotransportnykh sredstvakh teplovykh akkumulyatorov fazovogo perekhoda*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Theory and practice of application in motor vehicles of thermal accumulators of phase transition. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2005, 361 p.

7. Dinceer I., Rosen M. A. *Thermal energy storage: systems and applications*. University of Ontario Publ., 2011, 648 p.

8. Shul'gin V.V., et al. *Teplovoy akkumulyator fazovogo perekhoda* [Heat accumulator of phase transition]. Patent RF, no. 2187049 C1, 2000.

9. Bublik S. A., et al. *Teplovoy akkumulyator fazovogo perekhoda s samoreguliruemym ustroystvom ehlektropodogreva* [Heat accumulator phase transition with a self-regulating electric heating device]. Patent RF, no. 2506503 C1, 2012.

10. Levenberg V. D. *Akkumulirovanie tepla* [Heat accumulation]. Moscow, Nauka Publ., 2011, 83 p.

11. Sidorenko V. D. *Primenenie induktsionnogo nagreva v mashinostroenii* [Application of induction heating in mechanical engineering]. St. Petersburg, Mashinostroenie Publ., 2010, 230 p.

12. Matveev A.N. *Ehlektrichestvo i magnetizm* [Electricity and magnetism]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2013, 463 p.

13. Salamatin M. A. *Kombinirovannaya sistema zashchity ehnergeticheskoy ustanovki teplovoza v usloviyakh nizkikh temperature*. Diss. kand. tekhn. nauk [Combined system of protection of power installation of the locomotive in the conditions of low temperatures. PhD in Sci. Tech. diss.]. Samara, 2012, 126 p.

14. Shabalin D. V., et al. *Teplovoy akkumulyator fazovogo perekhoda s induktsionnym ustroystvom ehlektropodogreva* [Phase transition heat accumulator with induction electric heating device]. Patent RF, no. 189233U1, 2018.

15. Babaev B. D. *Razrabotka i issledovanie ehnergosistem na osnove vozobnovlyaemykh istochnikov s fazoperekhodnym akkumulirovaniem tepla*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development and research of power systems based on renewable sources with phase-transition heat storage. Dr. Sci. Tech. diss.]. Makhachkala, 2016, 345 p.