

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634191>

EDN: ORTWJL



Электронагреватели с эффектом саморегулирования температуры топливной системы в дизельных двигателях

Александр Викторович Щегольков¹, Алексей Викторович Щегольков²¹ Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия;² Московский политехнический университет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Дизельные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) массово применяются в качестве силовых установок автотракторной техники, так как имеют высокую энергетическую эффективность и надежность. Для ДВС очень важно обеспечить максимально быстрый запуск и стабильную работу на холостом ходе при температурах окружающей среды в диапазоне от -40 до 0 °С, что особенно важно в зимний период эксплуатации. Одним из подходов, связанных с улучшением условий запуска дизельного ДВС в холодное время года является применение системы электронагрева, в том числе с использованием материалов нагревателей на основе композитов с положительным температурным коэффициентом сопротивления, что позволяет адаптировать систему нагрева к минимальному потреблению мощности. Разработка конструкции системы электронагрева для топливных фильтров дизельных ДВС, системы управления и алгоритма её работы является актуальной технической задачей.

Цель работы — разработка электронагревательных полимерных композитов (ЭНПК), содержащих многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) для топливных фильтров дизельных ДВС.

Материалы и методы. В качестве полимерной матрицы был использован эластичный кремнийорганический компаунд, а электропроводящего дисперсного наполнителя — МУНТ, синтезированные электромагнитным излучением сверхвысокой частоты (СВЧ-метод) при воздействии на смесь ферроцена и графита в соотношении 1:1. Морфологию поверхности МУНТ исследовали на сканирующем электронном микроскопе при 5 кВ. Исследование температурного поля производилось с помощью тепловизора «Тесто-875-1» с оптической линзой $32 \times 23^\circ$.

Результаты. Рассмотрено техническое решение для подогрева топливного фильтра дизельного ДВС с помощью нагревательных элементов, обеспечивающие непосредственный контроль и стабилизацию температурного режима в процессе терморегулирования дизельного топлива. В основе процесса электронагрева композитного материала при протекании электрического тока лежит поляризация полимерной матрицы и туннелирование элементарного заряда в МУНТ. При терморегулировании в процессе электронагрева, и поддержания заданного температурного режима были взяты программируемые параметры управляющего микроконтроллера, который позволяет устранить снижение темпа нагрева ЭНПК и повысить их энергетическую эффективность в широком интервале температур работы топливopодводящей аппаратуры ДВС. С целью формирования ПО для системы управления ЭНПК использовано 5 режимов работы, к которым относится пуск, холостой ход и режимы под нагрузкой (25, 50, 75% от номинального значения полной загрузки ДВС).

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных электронагревателей для контролируемого нагрева топлива с заданной температурой, что позволяет снизить нагрузку на АКБ и существенно расширяет потенциальные возможности технологий электронагрева для автотранспортной техники.

Ключевые слова: дизельный двигатель; топливо; саморегулирование температуры; композит; многослойные углеродные нанотрубки; микроконтроллер.

Как цитировать:

Щегольков А.В., Щегольков А.В. Электронагреватели с эффектом саморегулирования температуры топливной системы в дизельных двигателях // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 2. С. 122–130. DOI: 10.17816/0321-4443-634191 EDN: ORTWJL

Рукопись получена: 10.07.2024

Рукопись одобрена: 11.05.2025

Опубликована online: 20.05.2025

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634191>

EDN: ORTWJL

Electric Heaters with The Effect of Self-Regulation of Fuel System Temperature in Diesel Engines

Alexander V. Shchegolkov¹, Alexey V. Shchegolkov²¹ Tambov State Technical University, Tambov, Russia;² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Diesel internal combustion engines (ICE) are massively used as powerunits of automotive and tractor machinery, as they have high energy efficiency and reliability. It is very important to provide the fastest possible start-up for internal combustion engines and stable idling operation at ambient temperatures in the range from -40 to 0 °C, especially in the winter period of operation. One of the approaches connected with improvement of conditions of starting a diesel engine in cold season is application of electric heating system, including the use of heater materials based on composites with positive temperature resistance coefficient that allows adapting the heating system to minimum power consumption. Development of the design of the electric heating system for diesel engine fuel filters, the control system and the algorithm of its operation is a relevant technical task.

AIM: Development of electro-heating polymer composites (EHPC) containing multilayer carbon nanotubes (MCNTs) for diesel engine fuel filters.

METHODS: An elastic organosilicon compound was used as a polymer matrix, and MCNTs synthesized by ultrahigh frequency electromagnetic radiation (UHF method) by exposure to a mixture of ferrocene and graphite in a 1:1 ratio were used as an electrically conductive dispersed filler. The surface morphology of MCNTs was studied with a scanning electronic microscope at 5 kV. The temperature field was studied using the "Testo-875-1" thermal imager with an optical lens of 32 × 23°.

RESULTS: The technical solution for heating the fuel filter of diesel engine by means of heating elements ensuring direct control and stabilization of the temperature mode in the process of diesel fuel thermoregulation is considered. Polarization of polymer matrix and tunneling of elementary charge in MCNTs lie in the basis of the process of electric heating of composite material at the electric current. Programmable parameters of the microcontroller were used for thermoregulation in the process of electric heating and sustaining the given temperature mode, which makes it possible to eliminate the decrease in the heating rate of EHPCs and to increase their energy efficiency in a wide range of temperatures of operation of the fuel supply equipment of an internal combustion engine. To form the software for the EHPCs control system, 5 operation modes including start-up, idling and modes under load (25, 50, 75% of the nominal value of the full load of the internal combustion engine) were used.

CONCLUSION: The practical value of the study lies in the possibility of using the proposed electric heaters for controlled heating of fuel with a given temperature, which reduces the load on the battery and significantly expands the potential capabilities of electric heating technologies for automotive and tractor machinery.

Keywords: diesel engine; fuel; temperature self-regulation; composite; multilayer carbon nanotubes; microcontroller.

To cite this article:

Shchegolkov AV, Shchegolkov AV. Electric Heaters with the Effect of Self-Regulation of the Fuel System Temperature in Diesel Engines. *Tractors and agricultural machines*. 2025; 92(2):122–130. DOI: 10.17816/0321-4443-634191 EDN: ORTWJL

Submitted: 10.07.2024

Accepted: 11.05.2025

Published online: 20.05.2025

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть автотракторной техники эксплуатируется с применением дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1]. Для дизельных ДВС характерен контакт с окружающей средой [2], что проявляется в прямой зависимости рабочих параметров ДВС (вязкости масла, температуры масляного фильтра, температуры топлива и т.д.) от температуры воздуха из впускного коллектора. Дизельные ДВС характеризуются повышенным выбросом токсичных газов, в особенности NO_x [3]. Следует отметить, что дизельный ДВС на холостом ходу полностью прогревается при оборотах, приблизительно 650–850 об/мин, а при низких температурах, обороты находятся в диапазоне 850–1500 об/мин [4]. Высокое значение оборотов дизельного ДВС означает, что за этот период из впускного коллектора попадет большое количество холодного воздуха. Выбросы выхлопных газов и расход топлива резко возрастают при холодном запуске двигателя, но уменьшаются при прогреве ДВС [1].

Вопросам предпусковой подготовки ДВС автотранспортной техники уделяется большое внимание и существуют различные технические решения, которые могут быть как автономными, так и стационарными [4]. Существуют такие аспекты предпусковой подготовки ДВС как энергетические и экономические, связанные с возможностью использования того или иного метода или технического решения.

В целях экономии энергии на запуск дизельного ДВС может использоваться система рекуперации отходящего тепла, составляющая около 75% энергии, вырабатываемая ДВС, частично теряемая с выхлопными газами и антифризом. Известна технология хранения подогретого антифриза в термосах для быстрого подогрева ДВС [5], учитывающая особенности системы пуска ДВС в условиях отрицательных температур [6]. Устройство термоса включает в себя: теплообменник, который выполнен из ребристых пластин и парафин — материал с фазовым переходом (МФП), заполняющий свободное пространство. МФП используется для хранения тепловой энергии, поступающей от ДВС в виде тепловых потерь необходимых для последующего использования в условиях холодного запуска. Благодаря нагреву менее чем за 1 минуту, температура холодного всасываемого воздуха для ДВС может изменяться от 0 до 30 °С. Быстрый нагрев основных узлов, позволяет преодолеть трудности холодного запуска для ДВС, особенно в условиях с повышенным наледообразованием, и осуществить подачу предварительно нагретого воздуха в ДВС в течение 1 мин.

Одним из эффективных технических решений, направленных на улучшение запуска ДВС является электрический нагрев [7], который осуществляется от аккумуляторной батареи (АКБ) автотранспортной техники через систему управления. Электрические нагреватели различного типа, можно устанавливать, как на отдельные узлы ДВС, например, топливный фильтр, так использовать

их в качестве переносного (портативного) устройства. Наиболее рациональным вариантом является электронагреватель на полимерной основе [8], который по сравнению с керамическим [9] способен выдерживать различные виды вибраций и механические нагрузки, а также обладает гибкостью, что обеспечит плотное прилегание к нагреваемой поверхности. Существуют различные типы полимерных матриц для изготовления нагревателей, однако наиболее эффективным и гибким решением является кремнийорганический компаунд [10,11] — для которого характерна высокая механическая прочность и стабильная работа в условиях низких температур.

Целью статьи является разработка электронагревательного полимерного композита (ЭНПК) с эффектом саморегулирования температуры для дизельных двигателей.

В соответствии с целью исследований были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка метода получения электронагревательного полимерного композита (ЭНПК) с эффектом саморегулирования температуры.
2. Проведение тестовых испытаний ЭНПК на фильтре для топливной системы дизельного ДВС.
3. Оптимизация параметров ЭНПК в зависимости от режимов работы ДВС с использованием микроконтроллерной системы управления.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Методика получения полимерного композита или ЭНПК

Полимерный композит получали путём добавления металлизированных МУНТ (СВЧ-синтез при воздействии электромагнитного излучения сверхвысокой частоты на смесь ферроцена и графита (1:1)) в жидкий кремнийорганический компаунд (Силагерм 8030), последовательно, сначала в компонент А, а затем Б (отвердитель на основе платинового катализатора) соответственно. Компаунд тщательно перемешивали на установке WiseStir HT 120DX (Корея) при 300 об/мин (5 мин).

Полимерный композитный материал добавлялся в специальную формовочную ёмкость до образования окончательно сформированных нагревательных элементов в виде плоских гибких пластин в соответствии с [12–14]. После чего, полученный композит помещался в вакуумный термощаф для удаления летучих компонентов, содержащихся в полимерной матрице.

Электропитание ЭНПК осуществлялось с помощью программируемого источника питания Актаком 1351 (Актаком, Россия) в режиме пульсирующего потенциала от 0 до 24 В. Исследование температурного поля производилось с помощью тепловизора «Тесто-875-1» с оптической линзой 32 × 23° (SE & Co. KGaA, Testo, Ленцкирх, Германия). Общий вид и принципиальная схема подключения ЭНПК представлены на рис. 1.

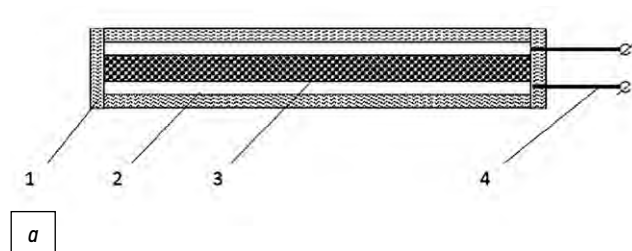


Рис. 1. Принципиальная схема электронагревательного полимерного композита: 1 — диэлектрическая оболочка; 2 — токосъёмник; 3 — функциональный материал нагревателя; 4 — токоподводящие проводники; *b* — общий вид плоских нагревателей.

Fig. 1. Structural scheme of an electrically heated polymer composite: 1: dielectric shell; 2: current collector; 3: functional material of the heater; 4: lead wires; *b*: general view of flat heaters.

Методика исследования структуры МУНТ

Морфологию поверхности МУНТ исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «TESCAN LYRA 3» (TESCAN, Чехия) при 5 кВ. Для измерения спектров комбинационного рассеяния света использовали спектрометр на базе конфокального микроскопа («Spectra», NT-MDT SI). Объектив $100 \times$ с $NA = 0,7$, полупроводниковый лазер ($\lambda = 532$ нм, мощность возбуждения около 50 мВт).

На рис. 2 показаны сканирующая электронная микроскопия и спектр комбинационного рассеяния МУНТ с металлизацией поверхности.

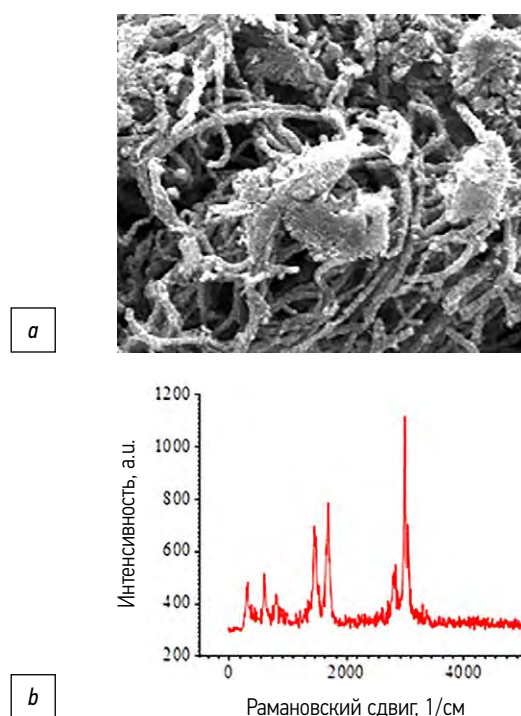


Рис. 2. Морфологические и структурные свойства углеродных нанотрубок с металлизацией: *a* — сканирующая электронная микроскопия металлизированных многослойных углеродных нанотрубок; *b* — спектр комбинационного рассеяния металлизированных многослойных углеродных нанотрубок.

Fig. 2. Morphological and structural properties of carbon nanotubes with metallization: *a*: scanning electron microscopy of metallized multilayer carbon nanotubes; *b*: Raman scattering spectrum of multilayer carbon nanotubes.

МУНТ представляют собой пучки углеродных нанотрубок, которые между собой имеют переплетения и при этом по КР спектрам следует отношение пиков D/G характерные для многослойных углеродных нанотрубок.

Методика подключения ЭНПК к системе электропитания ДВС ЯМЗ 238

Полученные ЭНПК подключали параллельно, объединяя их в секции с образованием теплового контакта между композитом и топливным фильтром (за счёт гибкости нагревателя — формировался плотный тепловой контакт). Для ограничения скачков тока в отдельных секциях (рис. 3) каждая из них последовательно соединялась с полимерным предохранителем.

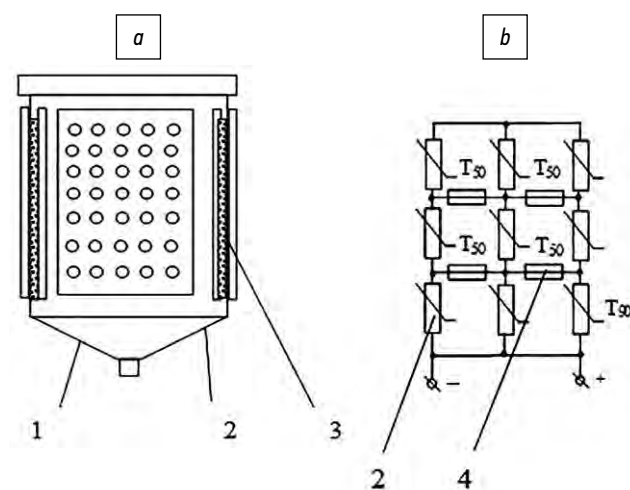


Рис. 3. Электронагревательный полимерный композит в топливном фильтре со схемой включения: *a* — расположение электронагревательного полимерного композита в топливном фильтре (ФТО); *b* — схема включения электронагревательного полимерного композита: 1 — топливный фильтр; 2 — электронагревательного полимерного композита; 3 — фильтрующий элемент; 4 — элемент для устранения высоких токов.

Fig. 3. Electrically heated polymer composite in a fuel filter with wiring scheme: *a*: location of electro-heating polymer composite in the fuel filter (FTO); *b*: wiring scheme of the switching on electro-heating polymer composite: 1: fuel filter; 2: electro-heating polymer composite; 3: filtering element; 4: element for elimination of high currents.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Система управления ЭНПК, представленная на рис. 4, позволяет стабилизировать температуру топлива и мощность нагревательного элемента в процессе нагрева, а также изменять число греющих секций в зависимости от режима топливоподачи. При этом система имеет как прямую, так и обратную связи между отдельными блоками.

ЭНПК имеют непосредственное регулирование через систему управления, которая реализуется с помощью программируемого микроконтроллера. Сигнал от первичного измерителя температуры (см. рис. 4) поступает на систему управления и преобразуется в АЦП (аналого-цифровой преобразователь), который в свою очередь определяет значение питающего тока ЭНПК за счёт изменения числа включённых секций нагревателей через ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь). Температура ЭНПК постоянная (в установившемся режиме) и зависит от значения питающего напряжения, в тоже время потребляемый ток зависит от температуры топливного фильтра и топлива и характеризуется нелинейной зависимостью.

В результате обеспечивается адаптированный подогрев топливной системы или так называемый эффект саморегулирования температуры.

На рис. 5 показана динамика прогрева ЭНПК в течение 5 мин. При этом, представленные характеристики имеют нелинейный характер нагрева. Режим электропитания соответствует напряжению 12 В, что приближено к режиму электропитания АКБ.

Согласно рис. 5, а температура ЭНПК выходит на плато, после приблизительно 250 с, т.е. происходит температурная самостабилизация (см. рис. 5, а), которая следует из уменьшения тока до рабочего значения (см. рис. 5, б). Это указывает, на то, что процессы, происходящие в ЭНПК, характеризуются взаимосвязью тепловых и электрических явлений. В основе процесса электронагрева композитного материала при протекании электрического тока лежит поляризация полимерной матрицы и туннелирование элементарного заряда в МУНТ.

Исходя из уравнений теплового баланса для устройства терморегулирования топлива с ЭНПК, получена система дифференциальных уравнений с начальными условиями и параметрами варьирования:

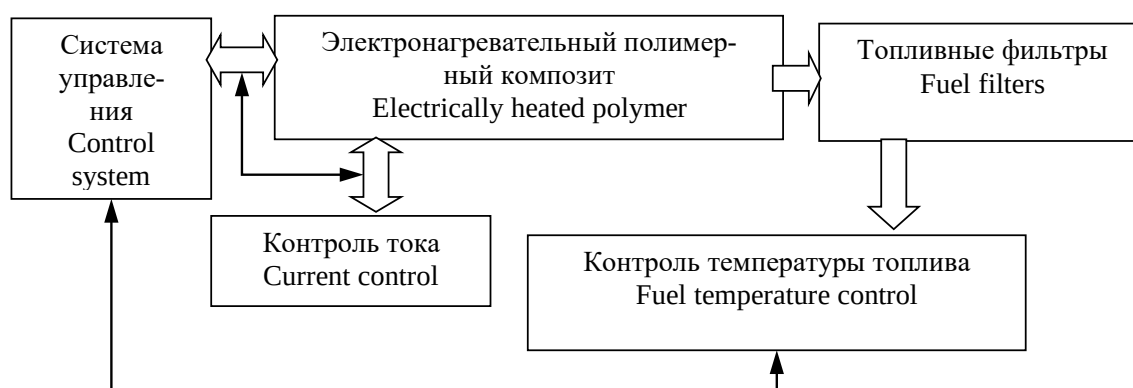


Рис. 4. Система управления электронагревательным полимерным композитом (ЭНПК).

Fig. 4. The electrically heated polymer composite (ENPC) control system.

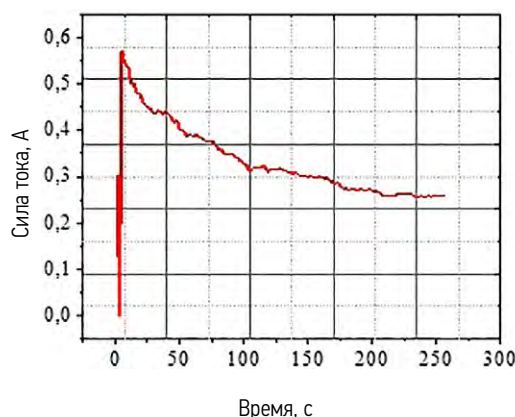
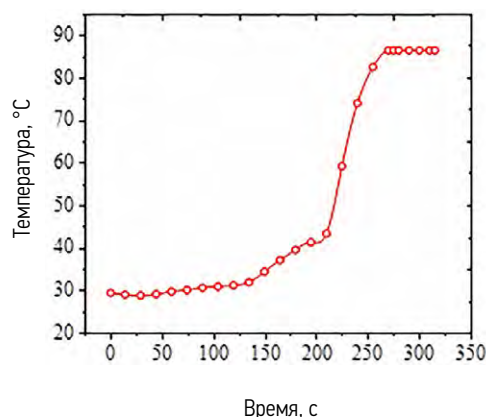


Рис. 5. Термограммы картера с моторным маслом и топливным фильтром: а — динамика изменения температурного режима; б — пусковой ток нагревательных элементов.

Fig. 5. Thermal curves of a crankcase with engine oil and a fuel filter: а: dynamics of temperature mode change; б: inrush current of heating elements.

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\text{эн}} C_{\text{эн}} h_{\text{эн}} F_{\text{эн}} \frac{dT_{\text{эн}}}{d\tau} &= (P_{\text{эн}}) - K_{1-2} F_1 (T_{\text{эн}} - T_T) - K_1 F_{11} (T_{\text{эн}} - T_{\text{окр}}) \\ \rho_T C_T V_T \frac{dT_T}{d\tau} &= K_{2-3} F_2 (T_{\text{эн}} - T_T) - K_3 F_3 (T_T - T_{\text{окр}}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

начальные условия: $\tau > 0$; $T_{\text{эн}} = +20^\circ\text{C}$; $T_T = T_{\text{окр}} = -20^\circ\text{C}$; $T = T(\tau)$; параметры варьирования: $P_{\text{эн}}$; $P \equiv P(T)$. где $P_{\text{эн}}$ — мощность ЭНПК, Вт; K_{1-2} , K_{2-3} , K_1 , K_3 — коэффициенты теплопередачи от ЭНПК в топливо, от ЭНПК во внешнюю среду, от элементов топливной системы во внешнюю среду соответственно, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$; $T_{\text{эн}}$, T_T , $T_{\text{окр}}$ — температура ЭНПК, топлива и внешней среды соответственно, $^\circ\text{C}$; $F_{\text{эн}}$, F_1 , F_2 , F_{11} , F_3 — площади ЭНПК в месте контакта с топливом, ЭНПК со внешней средой, ЭНПК с топливом, топливопроводов и ФТО соответственно, м^2 ; $C_{\text{эн}}$, C_T — теплоемкость ЭНПК и дизельного топлива, $\text{Дж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C})$; $h_{\text{эн}}$ — высота ЭНПК, м; V_T — объем топлива, м^3 ; $\rho_{\text{эн}}$, ρ_T — плотности ЭНПК и топлива, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ — время, с.

Следует отметить, что потребляемый нагревателями ток прямо пропорционален температуре топлива:

$$I_{\text{н}} \sim T_T \quad (2)$$

Однако, следует учитывать переходный режим работы нагревателя, который характеризуется пусковым током и в этом случае выражение (1) дополняется коэффициентом, учитывающим режим пуска. Для подбора нагревателей целесообразно учитывать особенности протекания пускового тока. Для нахождения силы тока при работе ЭНПК используется математическая зависимость [15]:

$$I(R(t_1)) = \sqrt{\frac{C_T \cdot D_T (\rho_{20} - N(T_2 - 20)) \Delta T}{R(t_1) \cdot \tau}}, \quad (3)$$

где C_T — теплоёмкость топлива, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; D_T — расход топлива, $\text{м}^3/\text{с}$; $R(t_1)$ — электрическое сопротивление ЭНПК, Ом; ρ_{20} — плотность дизельного топлива при 20°C , $\text{кг}/\text{м}^3$; N — поправочный коэффициент; ΔT — приращение температуры топлива при работе ЭНПК, $^\circ\text{C}$; τ — время, с.

При анализе (3) и температурной зависимости при нагреве из рис. 5 следует, что ЭНПК работает в режиме саморегулирования температуры, связанное с изменением ΔT и ΔD_T в топливе, что вызывает изменение силы тока $I(R(t_1))$ для ЭНПК.

Блок-схема алгоритма нагрева дизельного топлива с терморегулированием (рис. 6) используется в системе управления. Терморегулирование топлива при нагреве осуществляется за счёт того, что алгоритм функционирования ЭНПК основан на контроле и активном нагреве до температуры при сравнении с задаваемым значением T_3 в каждой секции T_2 и T_1 , а также потребляемого тока в ЭНПК.

На рис. 7, а представлен разрез топливного фильтра для дизельного топлива с ЭНПК на боковой поверхности (3D модель, полученная в программе Blender 4.1.1) и термограмма топливного фильтра в результате теплового воздействия нагревательного элемента рисунок 7, б. Тепловое воздействие на боковую поверхность топливного фильтра показана на рис 7, с, а тепловой поток с поверхности нагревателя на рис 7, d.

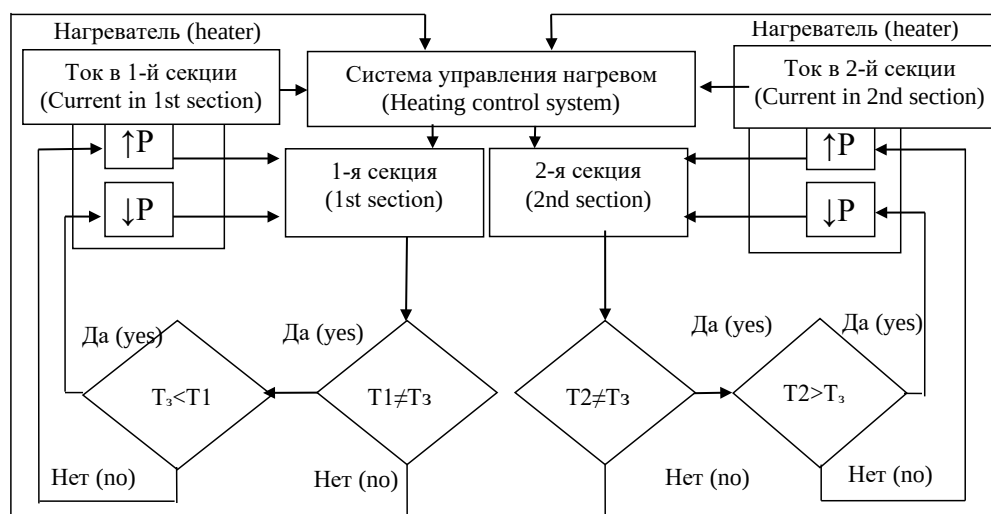


Рис. 6. Алгоритм нагрева дизельного топлива с терморегулированием.
Fig. 6. Algorithm of diesel fuel heating with thermal regulation.

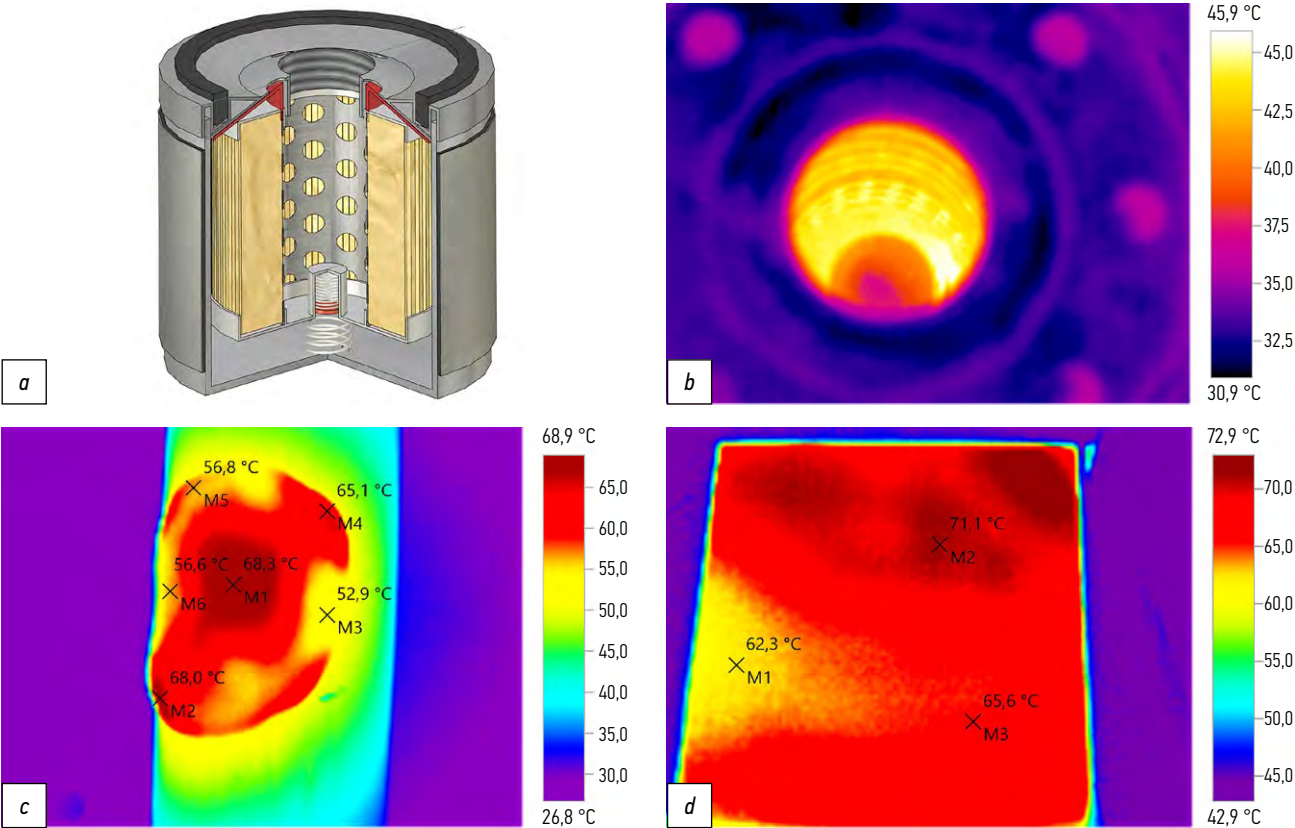


Рис. 7. Внутренние элементы фильтра с нагревателем и тепловые поля нагревательного элемента с фильтром: *a* — топливный фильтр; *b* — термограмма внутренней полости топливного фильтра; *c* — распределение температурного поля при боковом контакте с фильтром; *d* — термограмма нагревателя.

Fig. 7. Internal filter elements with a heater and thermal fields of the heating element with the filter: *a*: fuel filter; *b*: thermogram of the internal cavity of the fuel filter; *c*: distribution of the temperature field at the lateral contact with the filter; *d*: thermogram of the heater.

Из анализа термограммы следует, что боковой тепловой поток от нагревателя, позволяет нагреть топливный фильтр с дизельным топливом во внутренней полости до 45,9 °С.

Для создания программного обеспечения (ПО) управляющего микроконтроллера (система управления) ЭНПК было использовано уравнение вида [12], которое позволяет оценить изменение мощности в зависимости от температуры:

$$P(T) = \left(a - b \cdot \exp(-c \cdot D_T^e)\right) G_{ii}$$

(4)

Параметры уравнения (4) для ДВС ЯМЗ 238 представлены в табл. 1.

Корректирующий коэффициент (G_{ti}) позволяет учесть возможность снижения температуры окружающей среды с последующим повышением мощности ЭНПК за счёт включения большого количества секций ЭНПК в диапазоне температур от минус 10 до 40 °С. Для формирования ПО для системы управления ЭНПК использовано 5 режимов работы, к которым относится пуск, холостой ход и режимы под нагрузкой (25, 50, 75% от номинального значения полной загрузки ДВС).

Таблица 1. Параметры уравнения 4
Table 1. Parameters of Equation 4

Режим работы ДВС	Коэффициенты аппроксимации				Корректирующий коэффициент (G_{ti})		
	a	b	c	e	G_{t1} $T_4 < -10$	G_{t2} $T_4 < -20$	G_{t3} $T_4 < -40$
Пуск	120	196	0,1	0,1	1,1	1,2	1,27
Холостой ход	100	110	0,05	0,6	1	1,1	1,2
Работа под нагрузкой (25% от номинального значения)	140	150	0,11	1,1	0,9	1,2	1,4
Работа под нагрузкой (50% от номинального значения)	150	170	0,12	1,2	1,2	1,4	1,4
Работа под нагрузкой (75% от номинального значения)	170	190	0,14	1,3	1,3	1,5	1,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полимерный композит был получен путём добавления металлизированных МУНТ (синтезированных СВЧ-методом) в кремнийорганический компаунд. Применение электронагревателей на основе полимерного композита (ЭНПК), позволяет улучшить температурный режим для топлива, и соответственно условия запуска дизельного ДВС. При этом существенно улучшается их энергоэффективность за счёт придания эффекта саморегулирования температуры, обеспечивающегося благодаря металлизированным МУНТ с заданной структурой.

В основе процесса электронагрева композитного материала при протекании электрического тока лежит поляризация полимерной матрицы и туннелирование элементарного заряда в МУНТ. В процессе нагрева ЭНПК была получена система дифференциальных уравнений. В результате чего была разработана система управления ЭНПК с применением микроконтроллера.

Реализация подогрева топлива новым типом композитного нагревателя ЭНПК с эффектом саморегулирования температуры и управления микроконтроллером, работающим по заданному алгоритму, обеспечивалось аппроксимацией решения системы дифференциальных уравнений. Разработанный алгоритм управления нагревателями в системе топливоподдачи, учитывал, как температуру топлива, так и питающий ток и напряжение нагревателя. В результате чего поддерживалась температура дизельного топлива с заданной погрешностью в режимах запуска ДВС, холостого хода и при работе под нагрузкой (50% от номинального значения) соответственно.

Контролируемый нагрев топлива с заданной температурой позволяет снизить нагрузку на АКБ, что существенно расширяет потенциальные возможности технологий электронагрева для автотранспортной техники.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Александр В. Щегольков — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Алексей В. Щегольков — редактирование текста рукописи; Александр В. Щегольков — редактирование текста рукописи, создание изображений; Алексей В. Щегольков — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Deng Y, Liu H, Zhao X, et al. Effects of cold start control strategy on cold start performance of the diesel engine based on a comprehensive preheat diesel engine model. *Applied Energy*. 2018;210:279–287. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.093
2. Markov VA, Shlenov MI, Boldyrev AV, et al. Calculation study of air temperature influence on diesel engine

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00855, <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: Alexander V. Shchegolkov: search for publications on the topic of the manuscript, writing and editing the text of the manuscript, creating images; Alexey V. Shchegolkov: editing the manuscript text; Alexander V. Shchegolkov: editing the manuscript text, creating images; Alexey V. Shchegolkov: expert opinion, approval of the final version. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: The study was funded by the Russian Scientific Foundation grant No. 24-29-00855, <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: Authors did not use any previously published data at writing the paper.

Data availability statement: Editor's policy in terms of collective use of data is not applicable to this paper; any new data are neither collected nor created.

Generative AI: Generative AI technologies were not used in writing the paper.

Provenance and peer-review: The paper was submitted to the journal in a proactive way and was reviewed according to the standard procedure. Two external reviewers, a member of the editorial board and the scientific editor of the journal took part in the review.

performance. *Automobile industry*. 2024;(2):3–7. (In Russ.) EDN: PCQYKB

3. Sun H, Zhang, W, Wang Y. Experimental study on improving cold start performance of diesel engines at extremely low ambient temperatures with diethyl ether. *Energy*. 2023;283(129122). ISSN 0360-5442. doi: 10.1016/j.energy.2023.129122

4. Kramarenko GV, Nikolaev VA, Shatalov AI. *Garageless storage of cars at low temperatures*. Moscow: Transport, 1984:136. (In Russ.) EDN: WBJQYH
5. Park S, Woo S, Shon J, Lee, K. Experimental study on heat storage system using phase-change material in a diesel engine. *Energy*. 2017;119:1108–1118. doi: 10.1016/j.energy.2016.11
6. Soliman AS, Radwan A, Xu L, et al. Energy harvesting in diesel engines to avoid cold start-up using phase change materials. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;31:101807. doi: 10.1016/j.csite.2022.101807
7. Borisov GA, Kolodyazhnaya IN, Ichankin YV, Chernyshev AD. System of electric fuel heating in the supply system of diesel vehicles. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2014;(23):39–42. (In Russ.) EDN: TGDOTD
8. Shchegolkov AV, Shchegolkov AV. Anti-icing systems based on elastomers modified with carbon nanostructures with the effect of temperature self-regulation. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(1):141–151. (In Russ.) doi: 10.31242/2618-9712-2022-27-1-141-151
9. Musat R, Helerea E. Characteristics of the PTC Heater Used in Automotive HVAC Systems. *Emerging Trends in Technological Innovation*. 2010:461–468. doi: 10.1007/978-3-642-11628-5_51
10. Patent RUS No. 216724 / 22.02.2023. Zemtsova NV, Shchegolkov AV, Trufanov BS. Electric heater based on elastic matrix and conductive carbon and metal additives. EDN: LWASTY
11. Patent RUS 2398126 / 27.08.2010. Kalinin VF, Shchegolkov AV. System for thermal regulation of fuel and engine oil in internal combustion engines. EDN: QDHVFG
12. Shchegolkov AV, Shchegolkov AV, Chumak MA, et al. Synthesis of carbon nanotubes using microwave radiation for elastomer modification with improved electrical and thermal conductivity. *Prospective Materials*. 2024;4:54–65. (In Russ.) doi: 10.30791/1028-978X-2024-4-54-65
13. Shchegolkov AV, Nachtane M, Stanishevskiy YM, et al. The Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Heat-Release Properties of Elastic Nanocomposites. *Journal of Composites Science*. 2022;6(11):333. (In Russ.) doi: 10.3390/jcs6110333
14. Shchegolkov A, Shchegolkov A, Zemtsova N, et al. Properties of Organosilicon Elastomers Modified with Multilayer Carbon Nanotubes and Metallic (Cu or Ni) Microparticles. *Polymers*. 2024;16(6):774. (In Russ.) doi: 10.3390/polym16060774
15. Kalinin VF, Shchegolkov AV. System of electric heating of supply air and fuel thermoregulation in diesel engines. *Vestnik of Tambov State Technical University*. 2009;15(2):396–400. (In Russ.) EDN: KHPMTV

ОБ АВТОРАХ

* Щегольков Александр Викторович,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Электроэнергетика»;
адрес: Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106;
ORCID: 0000-0002-4317-0689;
eLibrary SPIN: 4893-5232;
e-mail: Energynano@yandex.ru

Щегольков Алексей Викторович,

канд. техн. наук,
доцент центра проектной деятельности;
ORCID: 0000-0002-1838-3842;
eLibrary SPIN: 4929-5059;
e-mail: alexxx5000@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Alexander V. Shchegolkov,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor,
Assistant Professor of the Electric Power Engineering Department;
address: 106 Sovetskaya st, Tambov, Russia, 392000;
ORCID: 0000-0002-4317-0689;
eLibrary SPIN: 4893-5232;
e-mail: Energynano@yandex.ru

Alexey V. Shchegolkov,

Cand. Sci. (Engineering),
Assistant Professor of the Project Activity Centre;
ORCID: 0000-0002-1838-3842;
eLibrary SPIN: 4929-5059;
e-mail: alexxx5000@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author