

Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И.
K. K. Kim, S. N. Ivanov, M. I. Khismatulin

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НАГРЕВА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

ELECTROMECHANICAL DIESEL FUEL HEATING SYSTEM FOR VEHICLES

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical and Heat Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); Russian Federation, 190031, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 9; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Хисматулин Марат Ильдусович – аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: lokomotivlar@gmail.com.

Marat I. Khismatulin – Post Graduate Student, Electrical and Heat Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); 190031, Saint Petersburg, 9 Mos-cowsky pr. E-mail: lokomotivlar@gmail.com.

Аннотация. При отрицательных температурах окружающей среды дизельное топливо становится вязким и распыление его форсунками затрудняется. Данная проблема решается использованием автономных предпусковых подогревателей. Рассматривается новый тип предпускового подогревателя, осуществляющего одновременно как нагрев, так и перекачку топлива. Он сконструирован на базе электромеханического преобразователя. Подогреватель обеспечивает независимую регулировку температуры топлива, давления и производительности, является высокотехнологичным и характеризуется высокой надёжностью.

Summary. At subzero ambient temperatures, diesel fuel becomes viscous, and spraying it with injectors becomes difficult. This problem is solved by using autonomous preheaters. A new type of preheater is being considered, which simultaneously performs both heating and pumping of fuel. It is designed on the basis of an electromechanical converter. The heater provides independent adjustment of fuel temperature, pressure and performance, it is high-tech, and is characterized by high reliability.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, дизельное топливо, двигатель, подогрев, температура, напор.

Key words: electromechanical converter, diesel fuel, engine, locomotive, heating, temperature, pressure.

УДК 621.313.5:621.365.9

Введение. Известны трудности запуска дизельного двигателя при отрицательных температурах окружающей среды, что связано прежде всего с особенностью воспламенения дизтоплива. При отрицательных температурах окружающей среды топливо становится вязким и распыление его форсунками затрудняется. Данная проблема решается установкой различных дополнительных

предпусковых подогревателей топлива, которые представляют собой автономные электрические устройства, на топливные фильтры, магистраль или в бак.

В данной статье рассматривается предпусковой подогреватель, осуществляющий одновременно как нагрев, так и перемешивание дизельного топлива. Этот подогреватель сконструирован на базе электромеханического преобразователя. Одной из отличительных черт этого устройства является возможность отдельного регулирования величин нагрева и напора подогреваемого топлива.

Проведённый анализ показал, что рассматриваемый подогреватель обладает широкими регулировочными характеристиками, обеспечивает возможность получения и поддержания заданной температуры нагреваемого топлива, давления и производительности. Устройство является высокотехнологичным и характеризуется высокой структурной надёжностью.

Теоретическая часть. Подача вязких жидкостей по трубопроводным магистралям с помощью дополнительных нагнетательных устройств приводит к увеличению эксплуатационных расходов на транспортирование. Повысить эффективность процесса преобразования энергии вязкого дизельного топлива можно за счёт субоптимального выбора обоснованного состояния перемещаемой жидкости. Для этого необходимо установить закономерности течения жидкостей по трубопроводной системе с учётом воздействия технологических факторов. Процесс подачи подогреваемой жидкости характеризуется усреднённой продольной скоростью по сечению подводящей магистрали v (м/с) и объёмным расходом топлива Q (м³/с). Объём топлива, который прокачивается в единицу времени через поперечное сечение магистрали при заданном давлении, принимается основной характеристикой процесса подогрева и подачи дизельного топлива.

Скорость подачи и производительность (расход) устройства связаны соотношением

$$Q = v \times s,$$

где s – активная площадь поперечного сечения топливной магистрали, м².

При реализации процесса нагрева и подачи топлива следует учитывать, что определённая доля подведённой электрической энергии необратимо превращается в тепловые потери. Эта часть энергии (ΔE) зависит от физико-химических свойств топлива, в первую очередь от вязкости.

Потери энергии включают две составляющие. Первая представляет потери давления:

$$\Delta P = \rho \times \Delta E,$$

вторая – потери напора:

$$\Delta h = \Delta P / (\rho g),$$

где ρ – плотность топлива; g – ускорение силы тяжести.

Часть мощности, которая необходима для перемещения топлива с расходом Q в систему, определяется формулой

$$P = \Delta P \times Q.$$

Гидравлические потери также имеют две составляющие. Первая определяется при равномерном движении топлива на прямолинейных участках магистрали потерями давления на трение $\Delta P_{\text{тр}}$, вторая – местными потерями $\Delta P_{\text{м}}$ на относительно коротких, но сложно сконфигурированных участках трубопроводов. Вторая составляющая $\Delta P_{\text{м}}$ обусловлена, как правило, изменениями формы магистрали. Наиболее часто изменение гидравлических сечений связано с их уменьшением (диффузоры) или увеличением (конфузоры), наличием переходов на границах расслоения или соединения потоков технологического оборудования (задвижки, клапаны и т. п.).

Влияние второй составляющей возрастает при безразмерных числах Рейнольдса (2200 и более), когда наблюдается вихреобразование топлива, приводящее к дополнительным потерям энергии.

Гидравлические потери на прямолинейных участках магистрали $\Delta P_{\text{тр}}$ рассчитываются по формуле

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \times \frac{\rho l}{2d} \times v^2,$$

потери напора на прямых участках –

$$\Delta h_{\text{тр}} = \lambda \times \frac{l}{2dg} \times v^2,$$

где λ – гидравлический коэффициент трения; l – длина расчётного участка магистрали, м; d – активный диаметр трубопровода, м.

По формуле Вейсбаха потери давления $\Delta P_{\text{тр}}$ на местных сопротивлениях

$$\Delta P_{\text{тр}} = \xi \times \frac{\eta}{\nu} \times \frac{v^2}{2},$$

напора –

$$\Delta h_{\text{тр}} = \xi \times \frac{v^2}{2g},$$

где ξ – коэффициент местного гидравлического сопротивления; η – динамическая вязкость, Па·с; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Суммарные потери давления и напора, соответственно, определяются выражениями

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м}};$$

$$\Delta h = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{м}}.$$

Точные значения отдельных коэффициентов на практике не всегда известны. Так, гидравлический коэффициент трения λ зависит от характера течения дизельного топлива, качества обработки внутренней поверхности (шероховатости) трубопровода. Коэффициент местного сопротивления ξ дополнительно зависит от вида и конструкции переходных участков. Сравнительный анализ типовых конструкций гидравлических магистралей показывает, что местом концентрации потерь являются резкое изменение диаметра трубы, поворотные участки и т. д.

При выполнении проектных расчётов коэффициенты сопротивления, входящие в приведённые выше выражения, выбираются из справочников или определяются опытным путём [1–4].

Проведённый авторами анализ таких способов снижения потерь энергии при подаче дизельного топлива по трубопроводам, как конструкционное обеспечение плавного поворота потока жидкого топлива, снижение шероховатости внутренней поверхности трубопроводов, введение в поток жидкости полимерных добавок, внешние импульсные широкополосные воздействия и подогрев перекачиваемого высоковязкого топлива, показал, что наиболее перспективным является последний способ, но для его реализации требуется установка дополнительного энергетического оборудования, например типовых насосных агрегатов, состоящих из насоса и электродвигателя. В то же время аналогичный результат может быть получен за счёт использования нового класса технических устройств, обеспечивающих одновременный нагрев и подачу дизельного топлива. Такие устройства нашли техническую реализацию в теплогенерирующих электромеханических преобразователях, совмещающих функции генерации тепловой и механической энергии и повышающих энергетическую эффективность транспортных систем, работающих на дизельном топливе.

Предварительная оценка эффективности применения электромеханических устройств для подогрева дизельного топлива может быть сделана на основе зависимости потерь на перемещение вязкого топлива, определяемых по приведённым выше формулам с учётом влияния температуры на физико-химические свойства дизельного топлива [5–9].

Для количественного определения гидравлических потерь используется зависимость кинематической вязкости дизельного топлива от температуры, приведённая на рис. 1: летнего 1 и зимнего 2.

Следует отметить, что при точных расчётах возникает необходимость учёта влияния коэффициента теплоотдачи k_T с нагревательных поверхностей устройства. Коэффициент k_T зависит не только от размерных соотношений трубопровода, температуры, скорости и физических свойств топлива, но и от целого ряда теплофизических параметров. К ним относятся теплопроводности, удельные теплоёмкости, плотности, коэффициенты температуропроводности, динамические вязкости. Решение краевой задачи конвективного теплообмена сводится к решению системы уравнений энергии, теплоотдачи, движения и сплошности [10].

Динамические характеристики температуры топлива в произвольной точке описывает уравнение энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

Уравнение теплоотдачи устанавливает связь коэффициента k_T с температурами рабочей среды $T_{раб}$ и нагревательного элемента $T_{нэ}$:

$$k_T = - \frac{\lambda}{T_{раб} - T_{нэ}} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0}.$$

Компоненты вектора абсолютной скорости движения жидкого топлива в декартовой системе координат находятся как решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right),$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right),$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right).$$

Влияние скорости подачи топлива на изменение соотношения между динамической и кинематической вязкостями (через плотность топлива) устанавливает уравнение сплошности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}.$$

В частном случае, если жидкость рассматривается как несжимаемая, имеющая постоянную плотность, уравнение сплошности принимает вид

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0.$$

При известных геометрии рабочего канала, физических свойствах жидкой среды краевая задача считается определённой.

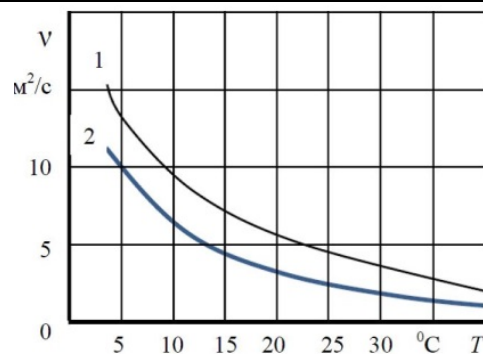


Рис. 1. Зависимость кинематической вязкости дизельного топлива от температуры

Распределение плотности теплового потока $q(t)$ для каждой точки нагревательной поверхности устройства учитывают граничные условия II рода:

$$\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) = -q(t),$$

конвективная теплоотдача с поверхности нагревательных элементов определяется граничными условиями III рода:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_T (T_{нэ} - T_{раб}) = -q.$$

Результаты. Приведённые теоретические выражения реализованы в ряде изобретений [11; 12] и в электромеханическом устройстве, обеспечивающем одновременный подогрев и подачу дизельного топлива, общая схема которого показана на рис. 2.

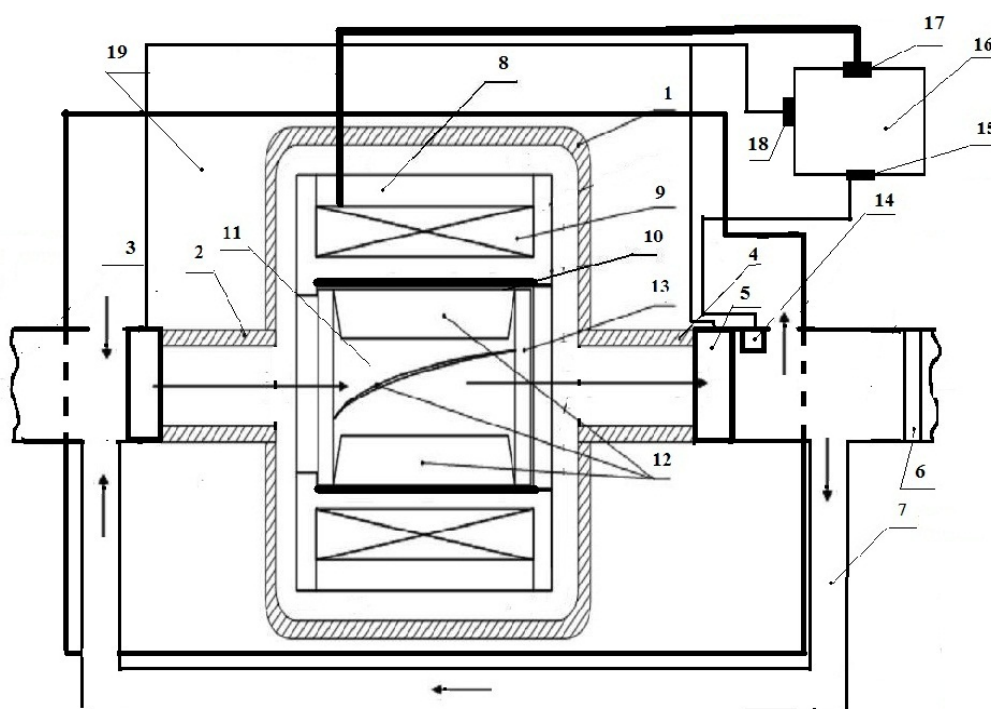


Рис. 2. Конструкция подогревателя

Несущим элементом устройства является корпус 1. С одной стороны корпуса расположен входной трубопровод 2 со встроенным клапаном 3. На другой стороне размещён выходной трубопровод 4, снабжённый клапаном 5 и топливным фильтром 6. С целью автоматизации процесса эксплуатации устройства клапаны 3 и 5 имеют электромагнитный привод. Трубопроводные участки 2 и 4 соединены. Байпасный трубопровод 7 соединяет участки 2 и 4. Внутри цилиндрического корпуса 1 расположен магнитопровод 8, в пазах которого уложена трёхфазная обмотка 9. В области, образованной внутренней частью магнитопровода 8, расположены две коаксиальные вторичные обмотки с рабочим напряжением, не превышающим 2 В. Материал неподвижной 10 и вращающейся 11 обмоток имеет высокую электрическую проводимость. Цилиндрическая вращающаяся обмотка 11 представляет совокупность продольных стержней и короткозамыкающих колец. Внутри обмотки 11 закреплены лопасти 12. Обмотка 11 и магнитопровод 8 в тангенциальном направлении разделены диэлектрическим элементом 13, который изготовлен из самосмазывающегося материала, например, композитного материала на основе эпоксидного компаунда с фторопластовым наполнителем и армирующими микрофиламентами. Особенно важно отметить, что обычных

подшипников нет и топливо проходит через устройство прямолинейно. Вот почему это устройство характеризуется очень малым гидравлическим сопротивлением. Конструктивный элемент 13 действует как радиально-упорный подшипник обечайки. Выходной патрубок 4 содержит датчик температуры 14, с коммутированным с входом 15 имеющего два выхода блока управления 16. Один выход блока 16 подключается к сетевой обмотке 9, а другой выход 18 – к клапанам 3 и 5. Устройство может размещаться внутри топливного бака 19, поскольку корпус 1 имеет герметичное исполнение.

На рис. 3 показан действующий образец данного устройства в сборе.

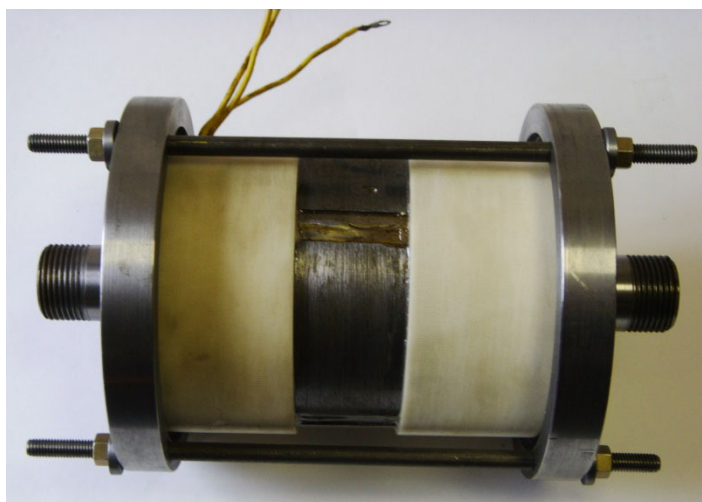


Рис. 3. Общий вид электромеханического преобразователя в сборе

Рис. 4 иллюстрирует расположение этого устройства в системе питания дизеля.

Выходной трубопровод 4 корпуса 1 (см. рис. 2) соединяется с обратным трубопроводом 20 (см. рис. 4). Трубопровод 20 присоединён через редукционный клапан 21 к топливному насосу высокого давления (ТНВД) 22. ТНВД подаёт топливо в камеру сгорания через форсунки 24, которые с помощью разгрузочной трубы 23 соединяются с редукционным клапаном 21.

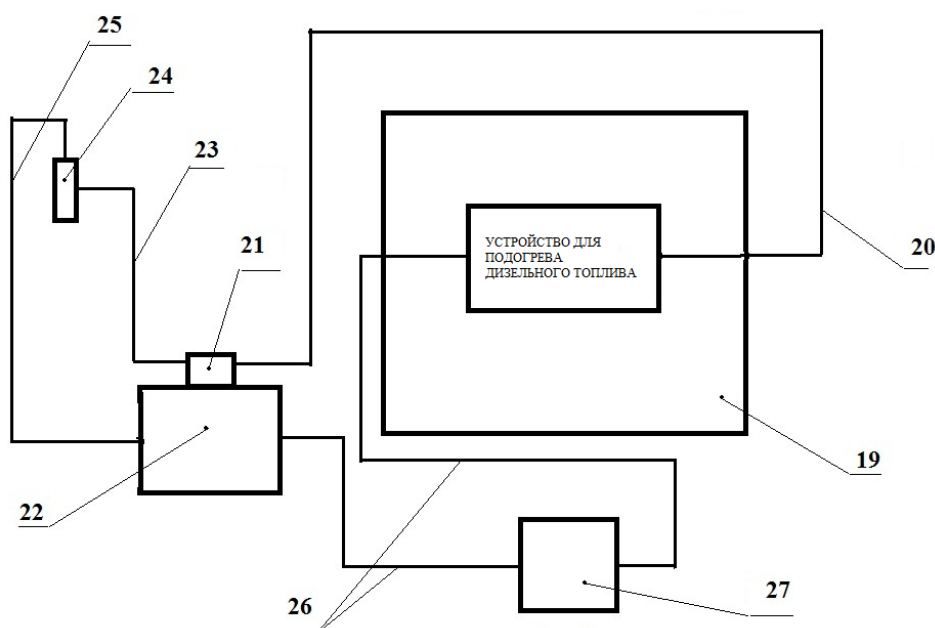


Рис. 4. Схема питания двигателя

Топливный насос высокого давления 22 соединён с входным клапаном 2 с помощью топливного трубопровода низкого давления 26 (см. рис. 4). Также используются топливный фильтр 27 и заправочный насос с механическим приводом.

Для практического применения данного устройства целесообразно рассмотреть принцип действия электромеханического подогревателя топлива. Первоначально блок управления 16 подаёт питание на сетевую обмотку 9 и одновременно приводит в открытое состояние электромагнитные клапаны 3 и 5 (см. рис. 1). Подведённая электрическая энергия преобразуется электромеханическим устройством в электромагнитную. Создаваемая многофазной обмоткой 9 намагничивающая сила приводит к появлению вращающегося магнитного поля. Это поле наводит вихревые токи во вторичных электропроводящих контурах (обмотки 10 и 11), что приводит вследствие известного закона Джоуля-Ленца к их нагреву. Преимуществом устройства по сравнению с традиционными электромеханическими преобразователями, в которых теплоту, выделяющуюся в результате джоулева нагрева, относят к негативным явлениям, является то, что здесь она идёт на нагрев дизельного топлива, которое псевдоожигается в топливном контуре.

Действие вихревых токов не ограничивается нагревом вторичных обмоток, но приводит к появлению крутящего момента на обмотке 11. Обмотка приходит во вращение, одновременно с ней перемещаются напорные элементы 12, являющиеся конструктивными элементами обмотки 11. В подогревателе лопасти 12 создают насосную головку для дизельного топлива. Создание давления в магистрали приводит к поступлению дизельного топлива по трубопроводу 2 в зону нагрева. Нагретая жидкость по пути, показанному на рис. 2 стрелками, возвращается через выходной трубопровод 4 и клапан 5 в топливный бак 19.

В качестве неосновного, но полезного источника нагрева можно рассматривать магнитные потери (гистерезис и вихревые токи) в магнитопроводе 8.

Поскольку устройство размещено в топливном баке 19, то часть тепла отводится конвекцией в нагреваемое топливо с наружной поверхности корпуса 1.

Устройство предполагает возможность полной автоматизации процесса нагрева и подачи топлива. Для контроля температуры используется датчик 14. При выходе температуры на детерминированные значения блок 16 управления и питания отключает сетевую обмотку 9, что приводит к прекращению нагрева топлива. Одновременно с отключением питания блок 16 генерирует сигнал на закрытие клапанов 3 и 5.

Подогретое до требуемой температуры топливо из бака 19 (см. рис. 4) по топливному трубопроводу низкого давления 26 поступает в топливный фильтр 27. Насос 22 нагнетает топливо в форсунки 24. Затем оно впрыскивается в цилиндры. Часть избыточного топлива, прошедшая через форсунки 24, через разгрузочную трубу 23 поступает к редукционному клапану 21 топливного насоса высокого давления 22 и затем возвращается в бак 19 по обратному трубопроводу 20.

Заключение. Рассмотренное устройство для подогрева дизельного топлива обладает высокой эффективностью, обусловленной повышением количества нагреваемого и подаваемого топлива. Это является следствием снижения гидравлического сопротивления в осевом направлении движущейся жидкости. Количество тепловой мощности, генерируемой нагревательными элементами, и объёмный расход топлива в единицу времени зависят от электромагнитных нагрузок, размерных соотношений и скорости вращения вторичной обмотки.

Количественное сравнение потерь при использовании предлагаемого устройства вместо стандартного оборудования показывает, что его применение позволяет повысить эффективность и снизить установленную мощность необходимого оборудования почти в два раза [13–19]. Более точная оценка эффективности электромеханических устройств для подогрева дизельного топлива может быть сделана на основе численного моделирования совмещённых процессов тепло-массопереноса на основе прикладных высокопроизводительных программ, например ANSYS, а полученные результаты могут использоваться при создании промышленных образцов таких устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сипайлов, Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах: учеб. пособие / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
2. Egorov, V., Abu-Khasan, M., Shikova, V. The Systems of Reservation of Bearing Structures Coatings of Transport Buildings and Constructions for Northern areas. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 753 (2), article № 022021, (2020).
3. Ivanov, S. Formation and study of coatings from composite material for special electrical devices / S. Ivanov, K. Kim // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 14th International Conference on Films and Coatings – 2019. doi:10.1088/1742-6596/1281/1/012034. P. 1-4.
4. Valinsky, O. S., Evstafev, A. M., Nikitin, V. V. The Effectiveness of Energy Exchange Processes in Traction Electric Drives with Onboard Capacitive Energy Storages. Russ. Electr. Engin. 89, 566–570 (2018). <https://doi.org/10.3103/S1068371218100103>.
5. Evstafev, A. M., Nikitin, V. V., Telichenko, S. A. Energy Converters for Hybrid Traction Power Systems Used in Electric Transport. Russ. Electr. Engin. 91, 77–81 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068371220020042>.
6. Nikitin, V. V., Sychugov, A. N., Rolle, I. A. et al. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock. Russ. Electr. Engin. 91, 87–92 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068371220020078>.
7. Ватаев, А. С. Математическое моделирование бесконтактного заряда аккумуляторной батареи беспилотного летательного аппарата / А. С. Ватаев, М. В. Михайлов, А. С. Соловьев // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2022: материалы Международной научно-практической конференции, 09-10 ноября 2022 г. – СПб.: ИПТ РАН, 2022. – С. 103-106.
8. Egorov, V., Kravchenko, A., Abu-Khasan, M. The Application of Evolutional Algorithm Optimization of Sprengel Systems of Transport Buildings and Structures for Northern Districts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 753 (2), article № 022020, (2020).
9. Rusanova, E. V., Abu-Khasan, M. S., Egorov, V. V. The Complex Evaluation of Geo Eco-Protective Technologies Taking into Account the Influence of Negative Temperatures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 753 (2). (2020).
10. Киселев, И. Г. Теплотехника на подвижном составе железных дорог: учеб. пособие / И. Г. Киселев. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 278 с.
11. Патент № 150936 U1 Российская Федерация, МПК7 H02N. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь: № 2014138671/1; заявлено 24.09.2014; опубликовано 10.03.2015 / Ким К. К., Иванов С. Н., Титова Т. С.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2 с.
12. Патент № 2740521 Российская Федерация, МПК7 B61D 27/00. Автоматизированная система отопления пассажирского вагона: № 2020126010; заявлено 30.07.2020; опубликовано 15.01.2021 / Иванов С. Н., Ким К. К., Хисматулин М. И.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2 с.
13. K. Kim, S. Ivanov. Problem statement for the analysis of electromechanical systems by simulation modeling methods / IOP Conf. Series: Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (ИТММ 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) Gelendzhik, 2021.
14. Ким, К. К. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, г. Саратов, 16-17 мая 2018 г. – Саратов: СГТУ, 2018. – С. 124-130.
15. Ким, К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии: моногр. / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 289 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/85859.html> (дата обращения: 10.10.2023). – Текст: электронный.
16. Ким, К. К. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 573-583.
17. Ким, К. К. Гидродинамическое моделирование гибридных энергетических устройств с использованием CFD-технологий / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 161-169.
18. Ким, К. К. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в теплогенерирующих перекачивающих электромеханических преобразователях / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Транспорт шёлкового пути. – 2020. – Вып. 3. – С. 3-14.
19. Ким, К. К. Электромеханическая система отопления пассажирского вагона / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 566-574.