

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 62-574.5, 004.9

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РАЗОГРЕВА МОТОРНОГО МАСЛА В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЕГО СВОЙСТВ

Статья поступила в редакцию 13.07.2018, в окончательном варианте – 21.10.2018.

Никитин Александр Викторович, филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, 142202, Российская Федерация, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17, адъютант, e-mail: nik.al2010@mail.ru

Чистопрудов Дмитрий Александрович, филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, 142202, Российская Федерация, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17, кандидат технических наук, доцент, e-mail: umasa76@mail.ru

Представлена последовательность действий при решении оптимизационной задачи по минимизации времени разогрева моторного масла в двигателях внутреннего сгорания. Для этой цели используется система пуска, состоящая из внешних электронагревательных элементов и контроллера управления. В процессе разогрева последний обеспечивает возможность согласованного изменения таких параметров: подаваемой мощности (N), задействованной площади электронагревательных элементов (F); скорости потока разогреваемого масла (w), формируемого с помощью электронасоса системы орошения коленчатого вала. Исследована динамика перераспределения подводимой к системе мощности между электронагревательными элементами и электронасосом в условиях значительного изменения физико-химических свойств масла при переходе из одного агрегатного состояния в другое. Представлены полученные с помощью полиномиальной аппроксимации зависимости изменения физико-химических свойств масла, описывающие их значения в диапазоне температур от -50 °C до $+20$ °C. Представлены результаты исследования реального процесса разогрева масла двигателя внутреннего сгорания, реализованного с помощью специализированного стенда, в пределах указанного диапазона температур. С помощью экспериментов, проведенных на этом стенде, удалось синтезировать модель формирования значений коэффициента теплоотдачи в зависимости от параметров w , t_m , (температура моторного масла), N и F , которая реализована с помощью контроллера нечеткого логического вывода, построенного по схеме Сугено. Обосновано решение поставленной оптимизационной задачи в терминах динамического программирования. В результате стало возможным нахождение зависимости времени разогрева ДВС от параметров w , t_m , N и F . При фиксированных значениях t_m и Δt это позволило найти оптимальные законы их (w , N и F) изменения, гарантирующие минимизацию времени разогрева моторного масла.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, система пуска двигателя внутреннего сгорания, моторное масло, процесс разогрева масла в картере двигателя внутреннего сгорания, коэффициент теплоотдачи, нечеткий аппроксиматор по схеме Сугено, оптимизационная задача управления, динамическое программирование

THE METHOD OF DETERMINING THE OPTIMAL CONTROL OF HEATING PROCESS OF THE ENGINE OIL UNDER CONDITIONS OF A PRIORI UNCERTAINTY OF ITS PROPERTIES

The article was received 13.07.2018, in the final version – 21.10.2018.

Nikitin Alexander V., branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter The Great, 17 Brigadnaya St., Serpukhov, 142202, Russian Federation, adjunct, e-mail: nik.al2010@mail.ru

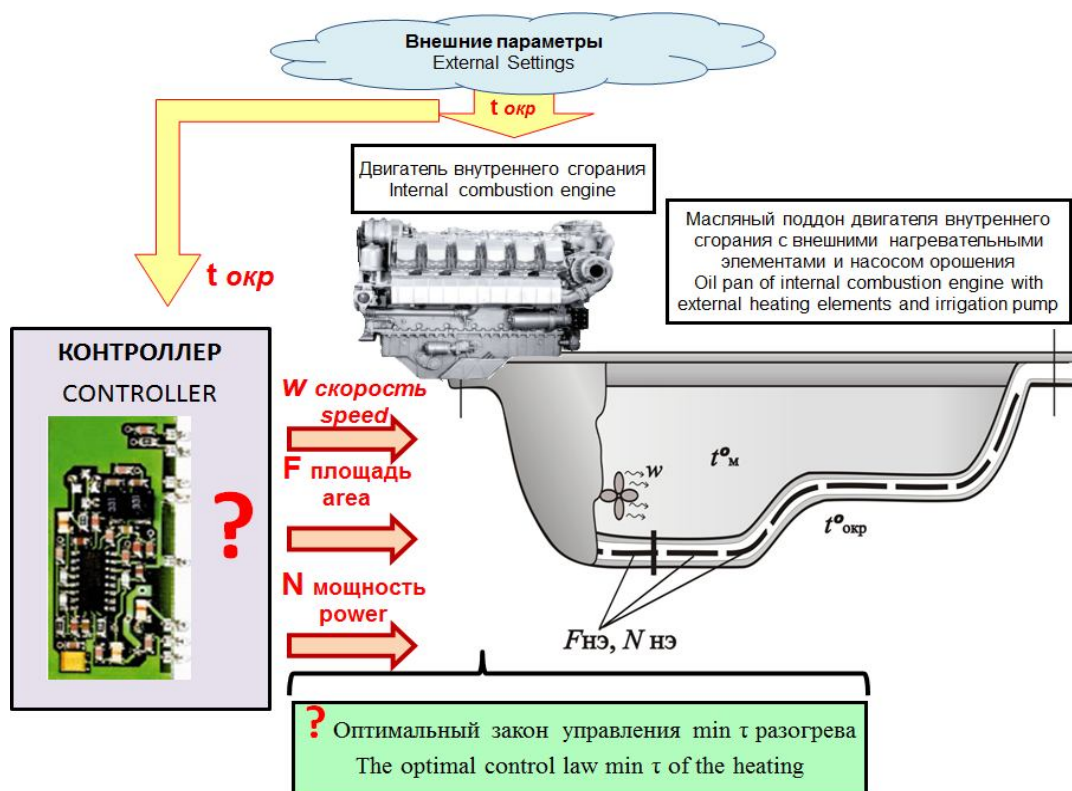
Chistoprudov Dmitry A., branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter The Great, 17 Brigadnaya St., Serpukhov, 142202, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: umasa76@mail.ru

The paper describes the sequence of making decisions for solving an optimization problem on minimization of engine oil heating time in internal combustion engine (ICE) by using a start-up system consisting of external electric heating elements and a master controller. In the process of heating, the latter ensures coordinated changes in such parameters as the given power (N), the involved area of electric heating elements (F) and speed of a heated oil flow (w) formed by means of a crankshaft irrigation system electric pump. The paper studies the dynamics of redistribution of the power supplied to the system between the electric heating elements and the electric pump under the conditions of a significant change in the physical and chemical properties of the oil when passing from one state to another. The change dependencies in the physical and chemical properties of the oil obtained by means of polynomial approximation is presented, describing their values in the temperature range from -50 °C to $+20$ °C. The paper presents results of the study of the real process of heating the engine oil,

implemented using a specialized stand within the specified temperatures. The stand experiments made it possible to synthesize the heat-transfer coefficient values formation model depending on the w , T_M (engine oil temperature), N and F parameters; the model is implemented using a fuzzy inference controller built according to the Sugeno scheme. The solution of the optimization problem in dynamic programming terms is justified. As a result, it became possible to find the dependencies of the internal combustion engine warm-up time on the w , T_M , N and F parameters; ; at fixed values of t_m and Δt , it allowed to find the optimal laws of their (w , N and F) changes that guarantee the minimization of engine oil heating time.

Keywords: internal combustion engine, internal combustion engine start-up system, engine oil, process of heating the oil in the internal combustion engine crankcase, heat-transfer coefficient, fuzzy approximator according to the Sugeno scheme, optimization control problem, dynamic programming

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Запуск двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в условиях значительных отрицательных температур требует предварительного разогрева, используемого в нем моторного масла. С целью сокращения времени запуска ДВС целесообразна оптимизация решений по разогреву масла при наличии ряда ограничений конструктивного и технологического характера.

Известно [6], что процесс разогрева моторного масла в поддоне картера ДВС внешними нагревательными элементами, расположенными на наружной поверхности поддона, связан с процессом передачи теплоты от стенок поддона к моторному маслу.

Данный процесс характеризуется динамическими свойствами, описывающими изменение интенсивности передачи теплоты, которая зависит от многих факторов, включая следующие: свойства самого объекта, подлежащего разогреву, свойства источника разогрева, граничные условия для объекта разогрева, сопутствующие теплопотери. По отношению к жидкостям такие факторы могут быть определены через коэффициенты теплопередачи и теплоотдачи, температуру жидкости, температуру нагревательного элемента и окружающей среды, площадь и мощность нагревательного элемента, скорость потока жидкости, ее физические свойства и т.д. Площадь теплоотдачи может меняться как путем подключения дополнительных секций нагревательных элементов, так и за счет изменения шероховатости поверхности нагревателя.

Несмотря на актуальность решения оптимизационных задач по разогреву масла при запуске ДВС, эта проблематика в существующих публикациях рассмотрена недостаточно полно. Поэтому целью данной статьи является устранение указанного недостатка.

Общая характеристика постановки задачи. В отношении процесса разогрева моторного масла в предпусковом режиме запуска [8] известно уравнение теплового баланса:

$$dQ_M = dQ_{нэ} - dQ_{окр}, \quad (1)$$

где dQ_M – количество теплоты, используемой на нагрев моторного масла (Дж); $dQ_{нэ}$ – общее количество теплоты, выделяемое нагревательными элементами в моторное масло (Дж); $dQ_{окр}$ – теплопотери от моторного масла во внутрикартерный воздух и через утеплитель в окружающий воздух (Дж).

Допустим, что система разогрева ДВС состоит из следующих частей [16, 17], представленных на рисунке 1.

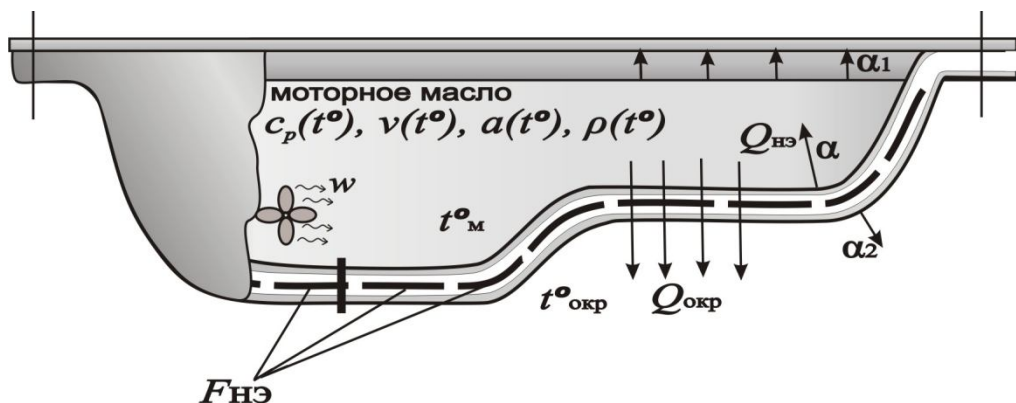


Рисунок 1 – Реальная схема для системы разогрева масла при запуске ДВС

На этой схеме представлены следующие элементы. 1. Поддон картера ДВС с залитым в него моторным маслом. Оно обладает определенными физико-химическими свойствами, такими как: t_m – температура моторного масла ($^{\circ}\text{C}$); ν – коэффициент кинематической вязкости моторного масла ($\text{м}^2/\text{с}$); c_p – удельная теплоемкость моторного масла ($\text{Дж}/(\text{кг} \times ^{\circ}\text{C})$); ρ – плотность моторного масла ($\text{кг}/\text{м}^3$); μ – коэффициент вязкости ($\text{кг} \times \text{с}/\text{м}^2$); a – коэффициент температуропроводности моторного масла ($\text{м}^2/\text{с}$), характеризующий собой скорость изменения его температуры (данный коэффициент в свою очередь зависит от коэффициента теплопроводности моторного масла, его удельного веса и теплоемкости); m – масса масла (кг); K – коэффициент теплопередачи от масла через поверхность поддона (утеплителя) в окружающий воздух ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times ^{\circ}\text{C})$); λ – коэффициент теплопроводности среды ($\text{Вт}/(\text{м} \times ^{\circ}\text{C})$); α – коэффициент теплоотдачи от поддона картера ДВС к моторному маслу, ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{K})$); α_1 – коэффициент теплоотдачи от моторного масла во внутрикартерный воздух, ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{K})$); α_2 – коэффициент теплоотдачи от утеплителя в окружающую среду, ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{K})$); $\delta_{п.у}$ – толщина стенки поддона, утеплителя, (м).

2. Электронасос системы орошения коленчатого вала ДВС, перемешивающий моторное масло в процессе его разогрева с определенной скоростью потока масла w .

3. Внешнее утепленное устройство для разогрева моторного масла, представляющее собой жесткий каркас из стеклопластика (фальшподдон), в точности повторяющий по форме внешнюю поверхность поддона картера ДВС, в который запаены нагревательные элементы в виде токопроводящей ткани. Теплообмен при контактировании фальшподдона с внешней поверхностью поддона картера ДВС можно принять как соответствующий контакту поверхностей с волнистостью и макронеровностями. Расчет контактных соединений с макронеровностями приведен в [13]. Для увеличения проводимости контакта за счет уменьшения воздушных прослоек может быть использована термопаста или силиконовая смазка. В данной статье шероховатость поверхностей при контактом теплообмене не рассматривается и не учитывается, а в расчетах применяется температура внутренней поверхности поддона картера ДВС t_n .

В формализованном виде схема системы разогрева масла представлена на рисунке 2.

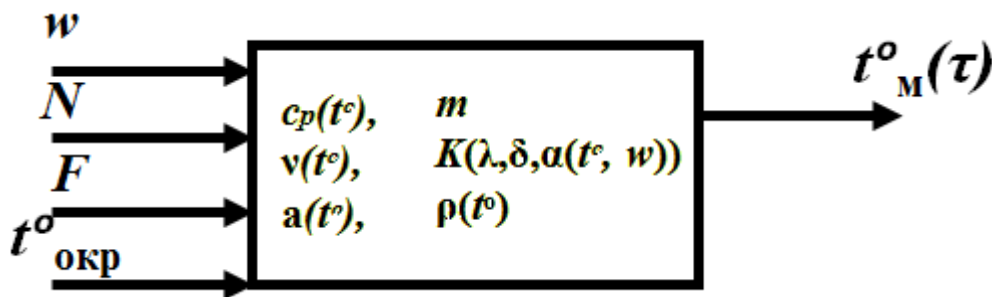


Рисунок 2 – Формализованное представление системы разогрева масла

Ключевой характеристикой процесса теплообмена в данной системе служит коэффициент теплоотдачи от поддона в моторное масло. Зная его, можно из уравнения теплового баланса получить следующее уравнение [7, 8, 9]:

$$(c_{p\text{п}} \times m_{\text{п}} + c_{p\text{м}} \times m_{\text{м}} + c_{p\text{у}} \times m_{\text{у}}) \frac{dt_{\text{м}}}{d\tau} = \alpha \times F_{\text{п}} \times (t_{\text{п}} - t_{\text{м}}) - \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}} \times (t_{\text{м}} - t_{\text{окр}}) - K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} \times (t_{\text{м}} - t_{\text{окр}}), \quad (2)$$

где $t_{\text{м}}$ – температура моторного масла ($^{\circ}\text{C}$); τ – время нагрева (с); α – коэффициент теплоотдачи от поверхности поддона к моторному маслу, ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{K})$); $\alpha_{\text{зм}}$ – коэффициент теплоотдачи от моторного масла во внутрикартерный воздух, ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{K})$); $t_{\text{п}}$ – температура поверхности поддона, ($^{\circ}\text{C}$); $F_{\text{п}}$ – площадь поверхности поддона (утеплителя), (м^2); $K_{\text{окр}}$ – коэффициент теплопередачи от масла через поверхность поддона (утеплителя) в окружающий воздух, ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times ^{\circ}\text{C})$); $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, ($^{\circ}\text{C}$); $c_{p\text{п}}$, $c_{p\text{м}}$, $c_{p\text{у}}$ – удельные теплоемкости соответственно поддона, масла и утеплителя, ($\text{Дж}/(\text{кг} \times ^{\circ}\text{C})$); $m_{\text{п}}$, $m_{\text{м}}$, $m_{\text{у}}$ – масса поддона, масла, утеплителя, (кг).

Часть параметров выражения (2) являются известными [1, 6]. Однако в условиях разогрева при экстремально низких температурах свойства объекта разогрева (моторного масла) не определены изготовителем. В то же время декларируется, что масло пригодно для работы и при таких температурах (здесь и ниже минимальным порогом является температура « -50°C », а в справочной литературе указаны свойства масла только до температуры « -20°C »).

Для построения адекватной математической модели разогрева «холодного» моторного масла необходимо в первую очередь исследовать его свойства в диапазоне возможных температур работы системы экстренного пуска ДВС, соответствующих нижнему пределу температур.

Информация по конкретным значениям параметров моторного масла известна лишь в реперных точках, не покрывающих интересующий нас диапазон температур (вне « -20°C » ... « -50°C »). Так как эти параметры представляют собой числовые характеристики некоторых интегральных свойств масла, то целесообразно для определения выражений при поиске их значений использовать методы, аналогичные описанным в [11] при определении зависимости сопротивления платинового преобразователя от температуры (МПТШ – 68).

Поэтому для нахождения таких зависимостей авторы настоящей статьи использовали методы, базирующиеся на полиномиальной регрессии. Ключевым параметром, позволяющим оценить качество решения этой задачи, является значение коэффициента детерминации (R^2) для построенного регрессионного уравнения. Оценивая его по таблице, авторы обосновали вид полученных функционалов:

$$\begin{cases} v = (0,00008 t^4 + 0,024 t^3 + 2,6148 t^2 + 126,44 t + 2352) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \\ c_p = (0,000002 t^3 - 0,0001 t^2 + 0,0047 t + 1,9757) \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \times ^{\circ}\text{C}); \\ \mu = (0,00008 t^4 - 0,0226 t^3 + 2,4551 t^2 - 118,38 t + 2192) \cdot 10^{-6} \text{ кг} \times \text{с}/\text{м}^2; \\ \rho = 0,00000006 t^6 - 0,00001 t^5 + 0,0007 t^4 - 0,0226 t^3 + 0,3298 t^2 - 2,283 t + 903,76 \text{ кг}/\text{м}^3; \\ a = (0,00007 t^2 - 0,0156 t + 7,5847) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \end{cases} \quad (3)$$

Таблица – Значения коэффициента детерминации при различных степенях полиномиальной регрессии, использованной для определения (описания) зависимостей параметров масла от температуры. Заливкой выделены наилучшие значения

Параметр масла	Степень полинома					
	1	2	3	4	5	6
v	0,665	0,941	0,995	0,9999		
c_p	0,977	0,99	0,9999			
μ	0,662	0,94	0,995	0,9999		
ρ	0,628	0,814	0,932	0,983	0,996	0,9999
a	0,993	0,9999				

Будем рассматривать разогрев как «управляемый процесс». Тогда его интенсивностью (скоростью) можно управлять путем изменения трех влияющих факторов: скорости потока масла w ; мощности N ; площади F нагревательных элементов, находящихся в контакте с маслом. При таких условиях для выяснения особенностей протекания процесса теплообмена авторы предложили реализовать эксперимент по определению эмпирической зависимости α от варьируемых факторов w , N , F при фиксированной температуре масла $t_{\text{м}}$, а также проверить состоятельность (адекватность) существующих моделей конвекции [6] в условиях экстремально низких температур.

В основе проведения этого эксперимента лежит использование лабораторной установки, общий вид которой представлен на рисунке 3.

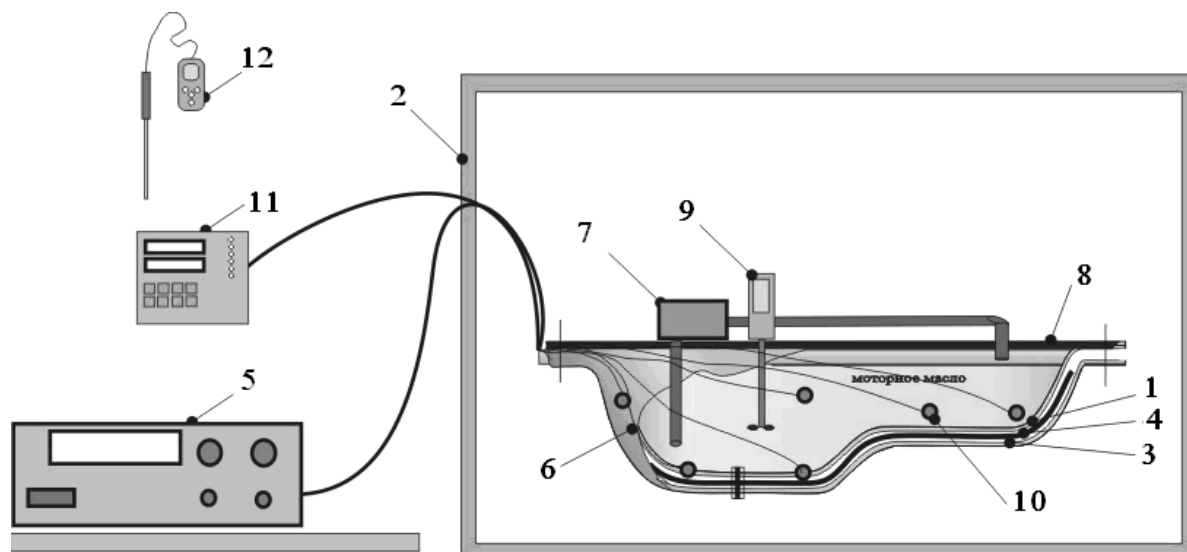


Рисунок 3 – Лабораторная установка для исследований коэффициента конвективной теплоотдачи от поддона к моторному маслу

Установка включает в себя следующее. Масляный поддон картера двигателя КамАЗ-740 (индекс «1» на рисунке 3), который помещен в климатическую камеру тепла, холода и влаги МНК-1000CS (индекс «2»). На наружной поверхности масляного поддона с помощью болтов закреплено внешнее электронагревательное устройство, выполненное в виде стеклопластикового фальшподдона (индекс «3»). Внутри него находятся запаянные нагревательные элементы (индекс «4»). Они размещены по всей внутренней поверхности фальшподдона посекционно, с параллельным подключением секций к источнику питания Union-TEST UT3030PS (индекс «5») – для обеспечения возможности варьирования площади нагрева масла. С целью уменьшения потерь тепла на наружной поверхности пластикового фальшподдона наклеен утеплитель (индекс «6»), выполненный из теплоизоляционного материала (пенофол). Сверху поддона помещен маслозакачивающий насос (индекс «7»), имитирующий работу системы орошения коленчатого вала двигателя и перемешивающий масло внутри поддона. С целью имитации замкнутого внутрикартерного пространства сверху поддона с помощью болтов плотно зафиксирована металлическая крышка (индекс «8»). Для измерения значения приложенного напряжения и силы потребляемого тока использовался экран индикации блока питания Union-TEST UT3030PS. Измерение скорости потока масла внутри поддона осуществлялось с помощью датчика потока жидкости с лопастным колесом IPFS-1XX (индекс «9»).

Регистрация значений температуры нагревательных элементов и внутренней поверхности поддона осуществлялась с помощью термометров сопротивления платиновых ТСП-27 (индекс «10»), подключенных к измерителю УКТ38-Щ4 ОВЕН (индекс «11») и термометра Testo-926 (индекс «12»).

Технология проведения экспериментов. Перед началом проведения опытов осуществлялась настройка измерительной аппаратуры. Производилась тарировка используемых термометров сопротивления, а их термодатчики фиксировались на внутренней поверхности поддона (8 штук с равномерным размещением по всей внутренней поверхности); на самих нагревательных элементах (по одному на каждую секцию); на наружной поверхности утеплителя (один на дне и по одному на каждой из четырех боковых сторон утеплителя).

Снаружи поддона на верхней крышке закреплялся маслозакачивающий насос, маслозаборная трубка которого размещалась недалеко от сливной пробки поддона. Сливная трубка для слива закачанного насосом масла была выведена в верхней противоположной части поддона. Датчик потока жидкости устанавливался между маслозаборной и сливной трубкой маслозакачивающего насоса. После установки термометров сопротивления в указанных точках экспериментальной установки в поддон заливалось моторное масло. В эксперименте использовалось моторное масло 0W-20 по классификации SAE и API (в соответствии с ГОСТ 17479.1-85 класс вязкости 8). Изначально планировалось проводить эксперимент с моторным маслом М-8-Д(м) ГОСТ 8581-78, но при «-30 °С» данное масло застывало.

Затем экспериментальная установка помещалась в климатическую камеру, где происходило охлаждение моторного масла до требуемой температуры («-50 °С», «-30 °С», «-10 °С») в течение нескольких часов.

Фактическая температура в климатической камере фиксировалась с помощью показаний внешнего встроенного монитора. Температура внутренней поверхности поддона измерялась с помощью тер-

мометров сопротивления платиновых ТСП-27, температура моторного масла – с помощью термометра Testo-926. Результаты измерений заносились в таблицу проведения эксперимента.

В силу того, что рассматривалась принудительная конвекция, авторы не занимались задачей распределения температур внутри объема масла (это задача моделирования вязкого течения жидкости на основе уравнения Навье-Стокса). Поэтому в любой точке рассматриваемого объема температура принималась одинаковой. Преобразование кинетической энергии движущегося масла в тепло также не учитывалось, так как оно пренебрежимо мало по сравнению с теплом, поступающим от нагревательных элементов. Температура внутренней поверхности поддона изменялась до $+70\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако при перемешивании масла с помощью насоса системы орошения его пригорание к стенкам поддона было исключено. Также после проведения очередного эксперимента физико-химические свойства моторного масла считались не изменившимися, т.е. соответствовали свойствам масла, которые были в начале эксперимента. Это фиксировалось визуально по отсутствию осадка, чистоте цвета, однородности структуры и сохранению вязкости масла.

Фактически измерению подлежала температура поддона, вычисленная как среднее значение по 8-ми показаниям термометров сопротивления, и температура масла. В данных условиях вариация значений первой температуры была невелика, так как использовалась средняя оценка. В то же время в силу допущения об однородности физико-химических свойств масла авторы предположили, что вариация и второго измеряемого показателя (температуры масла) в условиях стационарного режима должна стремиться к нулю. Поэтому при разработке плана проведения эксперимента авторы сочли не принципиальным решать задачу о нахождении границ ошибок воспроизводимости [14].

Из анализа эмпирического выражения, применяемого для вычисления значений α по формуле (4), авторы сделали вывод о его существенной нелинейности:

$$\alpha = \frac{N}{F(t_{\text{II}(N,w)} - t_{\text{M}(w,N,F,t_{\text{оп}})})} \quad (4)$$

В силу этого использование простейших методов построения плана эксперимента было отвергнуто. Учитывая, что определяемые по (4) значения α при экстремальных значениях варьируемых параметров менялись более чем в 3,4 раза, авторы также отказались от использования полнофакторного и симметричного плана эксперимента типа 3^k (время проведения исследований позволяло расширить диапазон уровней управляемых факторов более чем до «3»).

Для получения коэффициентов в эмпирическом законе изменения α по формуле (4) авторы сочли целесообразным использовать многоуровневый симметричный ортогональный план, реализующий эксперимент в следующем пространстве значений варьируемых факторов:

- площадь $F \in \{0,2; 0,34; 0,48\}$ (м^2);
- температура $t_{\text{м}} \in \{-50; -30; -10\}$ ($^{\circ}\text{C}$);
- мощность $N \in \{150; 340; 530; 720\}$ (Вт);
- скорость потока $w \in \{0,4; 1,0; 1,6; 2,2\}$ (м/с).

При таких условиях объем эксперимента составил 144 базовых опыта с различными сочетаниями градаций указанных выше факторов. Для проверки адекватности получаемой модели было реализовано еще 4 дополнительных опыта (вне зоны значений варьируемых факторов), сформировавших контрольную выборку.

Общий вид «классического» степенного многочлена, позволяющего описать неизвестную зависимость α , на контрольной выборке не дал приемлемых ошибок аппроксимации. Поэтому авторы для обоснования вида этого функционала проанализировали известное [6] уравнение Михеева:

$$\alpha = \frac{\lambda}{l_0} \times c_0 \times Re^{c_1} \times Pr^{c_2},$$

где c_0, c_1, c_2 – коэффициенты, значения которых зависят от конкретных условий конвективного теплообмена [1, 6, 12]; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; l_0 – характерный линейный размер поддона (м).

Из [6] известно, что критериальные уравнения конвективного теплообмена описываются числами подобия, являющимися безразмерными комплексами и составленными из величин, характеризующих явление, имеют вид:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \Big|_{t = const}, \quad Re = \frac{w \cdot l_0}{\nu} \Big|_{t = const}.$$

Так как, исходя из физического смысла, w непосредственно влияет на значение числа Рейнольдса (Re), а $t_{\text{м}}$ влияет на значение чисел Рейнольдса и Прандтля (Pr), то авторы предложили следующую зависимость для α :

$$\alpha = \frac{\lambda}{l_0} \times c_0(N,F) \times Re^{c_1(N,F)}(w,t^{\circ}) \times Pr^{c_2(N,F)}(t^{\circ}). \quad (5)$$

Для различных условий протекания процесса конвекции (в том числе и при разных значениях F , N , w и t_m) значения коэффициентов c_0 , c_1 , c_2 принимают различные значения [1, 5, 6, 15]. Авторы предположили, что эти коэффициенты в условиях эксперимента принимают неизменные значения, определяемые конструктивными особенностями поддона картера ДВС. При этом была предпринята попытка выявить аналитические зависимости коэффициентов c_0 , c_1 , c_2 от значений чисел Рейнольдса и Прандтля в условиях, когда величины последних определены варьируемыми факторами w и t_m , а N , $F = const$. Для этого использовался метод наименьших квадратов, целевая функция для которого представлена выражением

$$W = \sum_{i=1}^k \delta_i^2 = \sum_{i=1}^k (\alpha_{i\text{ип}} - \alpha^*_{\text{теор}}(c_0, c_1, c_2))^2 \rightarrow \min. \tag{6}$$

С учетом (5) можно сформировать систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{dW}{dc_0} = 0 \\ \frac{dW}{dc_1} = 0 \\ \frac{dW}{dc_2} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_0^* = f_0(N, F) \\ c_1^* = f_1(N, F) \\ c_2^* = f_2(N, F) \end{cases}, \tag{7}$$

Она приводит к следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} -\sum [Pr_i^{c_1} \times Re_i^{c_2} \times Y_i] + c_0 \sum [(Pr_i^{2c_1}) \times (Re_i^{2c_2})] = 0 \\ -c_0 \sum [Pr_i^{c_1} \times Re_i^{c_2} \times \ln(Pr_i) Y_i] + c_0^2 \sum [(Pr_i^{2c_1}) \times (Re_i^{2c_2}) \ln(Pr_i)] = 0 \\ -c_0 \sum [Pr_i^{c_1} \times Re_i^{c_2} \times \ln Re_i \dots Y_i] + c_0^2 \sum [(Pr_i^{2c_1}) \times (Re_i^{2c_2}) \ln(Re_i)] = 0 \end{cases} \tag{8}$$

Анализ этих выражений показывает, что неизвестные коэффициенты c_0 , c_1 , c_2 находятся как в степенях выражений, так и являются линейными множителями. Как следствие, аналитическое решение этой системы относительно указанных коэффициентов невозможно. Поэтому была предпринята попытка получения аналитического решения для данной системы уравнений, когда зависимости этих коэффициентов от N и F носят степенной характер.

Используя в качестве основы уравнение регрессии второго порядка и анализируя качественные характеристики этой модели (коэффициент детерминации и ошибки теста Стьюдента), авторы пришли к следующим выражениям (соответствующим коэффициентам детерминации $R^2_{c_0} = 0,96$; $R^2_{c_1} = 0,94$; $R^2_{c_2} = 0,96$):

$$\begin{cases} c_0 = k_0^{(0)} + \frac{k_1^{(0)}N}{1000} + \frac{k_2^{(0)}N^2}{10^6} + k_3^{(0)}F^2 + \frac{k_4^{(0)}NF}{1000} = f(k_0^{(0)}, k_1^{(0)}, k_3^{(0)}, k_4^{(0)}, N, F) \\ c_1 = k_0^{(1)} + \frac{k_1^{(1)}N}{1000} + \frac{k_2^{(1)}N^2}{10^6} + k_3^{(1)}F^2 + \frac{k_4^{(1)}NF}{1000} = f(k_0^{(1)}, k_1^{(1)}, k_3^{(1)}, k_4^{(1)}, N, F) \\ c_2 = k_0^{(2)} + \frac{k_1^{(2)}N}{1000} + \frac{k_2^{(2)}N^2}{10^6} + k_3^{(2)}F^2 + \frac{k_4^{(2)}NF}{1000} = f(k_0^{(2)}, k_1^{(2)}, k_3^{(2)}, k_4^{(2)}, N, F) \end{cases} \tag{9}$$

Были получены значения коэффициентов k_0 , k_1 , k_2 , k_3 , k_4 в формуле (9) для всех трех зависимостей (для c_0 , c_1 , c_2). При этом использовался критерий минимизации средней ошибки аппроксимации, аналогичный (6). Тем не менее при проверке полученной математической модели на адекватность с помощью анализа относительной ошибки аппроксимации при подстановке реальных значений w , t_m , N и F были получены неудовлетворительные результаты – на контрольной выборке среднее значение относительной ошибки составило 14 %, а максимальное значение этой ошибки было больше 32 %. Поэтому были предприняты попытки улучшить результаты аппроксимации посредством изменения вида целевой функции (использовалась минимизация средней абсолютной ошибки, минимизация средней ошибки по Камберу, минимизация Чебышевской ошибки). Однако это не привело к значительным улучшениям результатов (минимальная средняя относительная ошибка $\bar{\delta}_\alpha = 10\%$, а максимальная относительная ошибка для α , т.е. $\max \delta_\alpha = 26\%$).

Поэтому авторы предложили, что процесс конвекции при разогреве моторного масла в ДВС в условиях экстремально низких температур не является типовым и его специфичность имеет ключевое значение. В силу этого для нахождения аналитической зависимости α от варьируемых факторов была исследована возможность ее поиска (определения) методами нечеткого логического вывода, реализованного по схеме Сугено [4, 10, 24, 25]. В рамках этого подхода была использована цепь последовательных усложнений процедуры описания входных аргументов w , N и F путем введения их функций принадлежности с разными типами. В рамках проведенных 144 экспериментов (см. выше) наилучший результат был получен в условиях гауссовских симметричных функций принадлежности для всех четырех аргументов. При этом каждый из них имел по две сущности (функции принадлежности), а мощность – по три сущности. Общая схема полученного (использованного) нечеткого логического вывода представлена на рисунке 4.

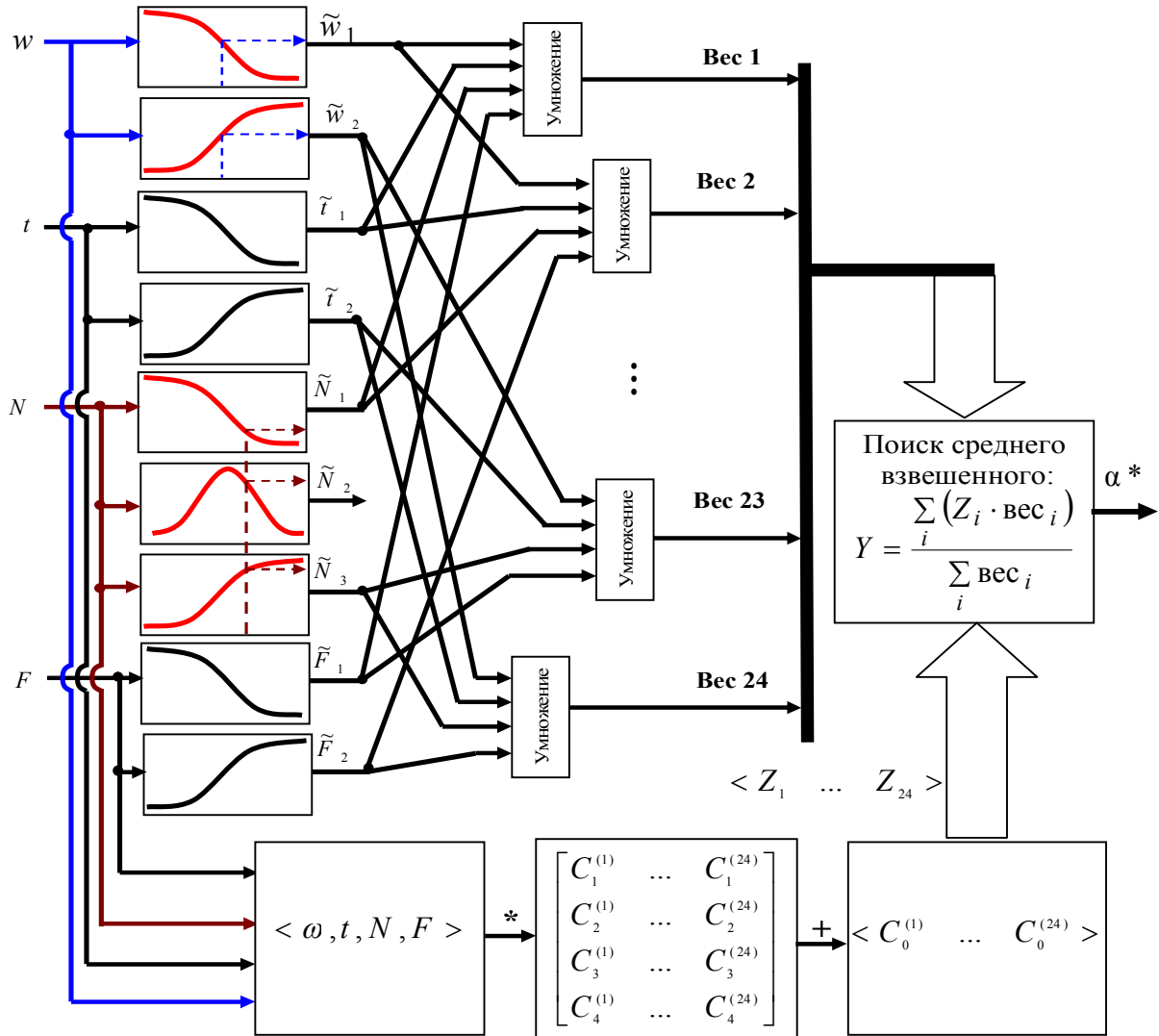


Рисунок 4 – Структурная схема полученного нечеткого логического вывода, аппроксимирующего исходные данные с наилучшей точностью

Выход такого нечеткого логического вывода получается как среднее гармоническое от входящих в него линейных сверток входов [18, 19]. Поясним это. Во-первых, количество слагаемых при нахождении среднего гармонического определяется количеством функций принадлежности аргументов. В нашем случае количество аргументов равно «4» (w, t, N и F), а количество их функций принадлежности равно 2, 2, 3 и 2. Общее количество комбинаций этих функций принадлежности равно $2 \times 2 \times 3 \times 2 = 24$ – именно столько слагаемых в среднем гармоническом, формирующем выход. Во-вторых, веса ($вес_i$) такой весовой свертки (при расчете среднего гармонического) получаются посредством произведения значений соответствующих функций принадлежности аргументов. Например, для первого веса его значение получается как $mf_1(w) \times mf_1(t) \times mf_1(N) \times mf_1(F)$. Для второго веса $вес_2 = mf_1(w) \times mf_1(t) \times mf_1(N) \times mf_2(F)$. То есть при формировании множества комбинаций функций принадлежности w расценивается как старший аргумент, имеющий 2 степени свободы, а F – как младший (также имеющий 2 степени свободы).

В-третьих, аргументами при нахождении среднего гармонического являются 24 (по количеству весов) линейные свертки четких значений входов, в каждой из которых используется уникальное множество весов ($\{C_{(w)}^{(k)}, C_{(t)}^{(k)}, C_{(N)}^{(k)}, C_{(F)}^{(k)}\}$) и 24 смещения ($\{C_{(0)}^{(1)}, C_{(0)}^{(2)}, \dots, C_{(0)}^{(24)}\}$).

Таким образом, аналитическая зависимость коэффициента теплоотдачи от варьируемых факторов описывается выражением

$$\alpha^*(w, t^\circ, N, F) = \frac{\sum_{i=1}^{24} (\text{вес}_i(w, t^\circ, N, F) \times [C_0^{(i)} + C_1^{(i)} \cdot w + C_2^{(i)} \cdot t + C_3^{(i)} \cdot N + C_4^{(i)} \cdot F])}{\sum_{i=1}^{24} \text{вес}_i(w, t^\circ, N, F)},$$

$$\text{вес}_i(w, t^\circ, N, F) = \text{вес}(b, c, d, e, w, t^\circ, N, F) = \mu_{\tilde{w}}(w) \cdot b \times \mu_{\tilde{t}}(t^\circ) \cdot c \times \mu_{\tilde{N}}(N) \cdot d \times \mu_{\tilde{F}}(F) \cdot e \quad (10)$$

Повторим, что схематически описанная выше процедура нечеткого вывода представлена на рисунке 4.

Для качественного решения такой задачи необходимо на 144 образах получить 138 неизвестных параметров (5 × 24 = 120 коэффициентов линейных сверток четких значений и по 2 параметра на 2 + 2 + 3 + 2 = 9 функций принадлежности). Эта задача решалась авторами в системе Anfis, входящей в пакет MATLAB, путем синтеза нечеткой нейросети (рис. 5) и ее обучения на 144 точках с помощью гибридного алгоритма [20, 21].

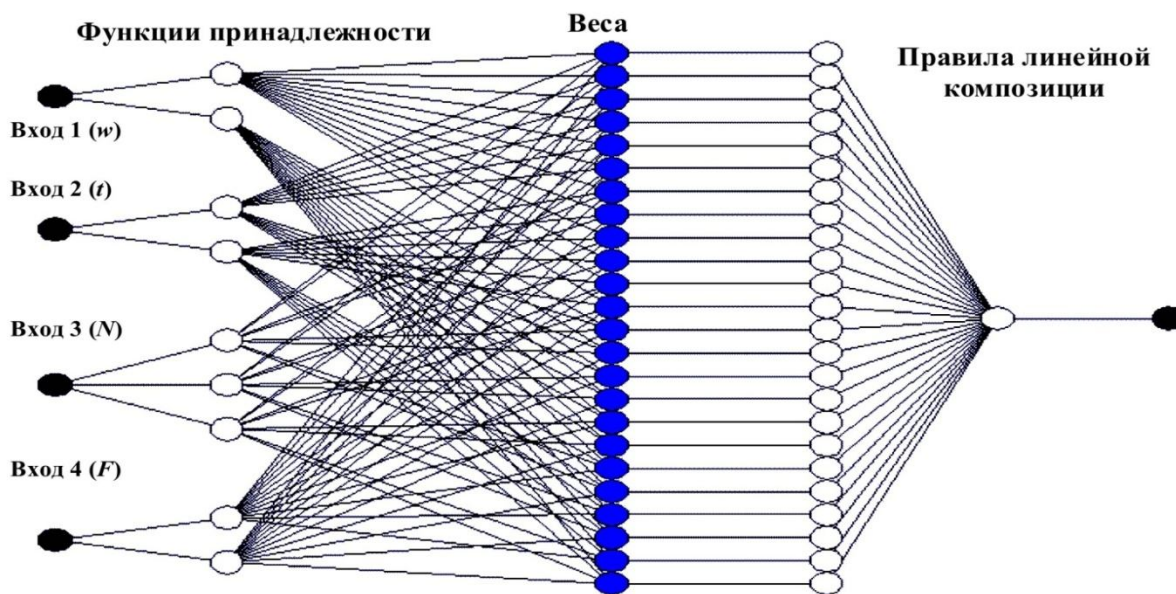


Рисунок 5 – Структура нейронечеткой нейросети, веса которой соответствуют параметрам наилучшего аппроксиматора

Качество предложенного функционала с учетом контрольной выборки можно оценить по результатам, представленным на рисунках 6 и 7. Полученное синтезированным нечетким логическим выводом значение средней относительной ошибки аппроксимации на обучающей выборке составило 0,29 %, а модуль максимальной относительной ошибки на контрольной выборке составил чуть меньше 0,8 %.

Таким образом, неопределенность в отношении свойств моторного масла при работе в условиях экстремально низких температур авторами была снята.

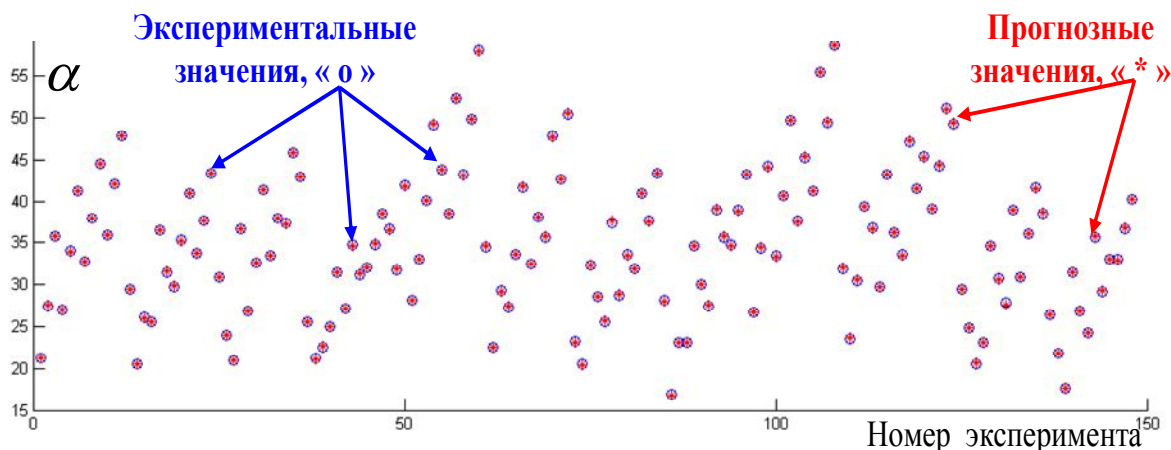


Рисунок 6 – Результат предсказания значения α , построенный с использованием нечеткого логического вывода

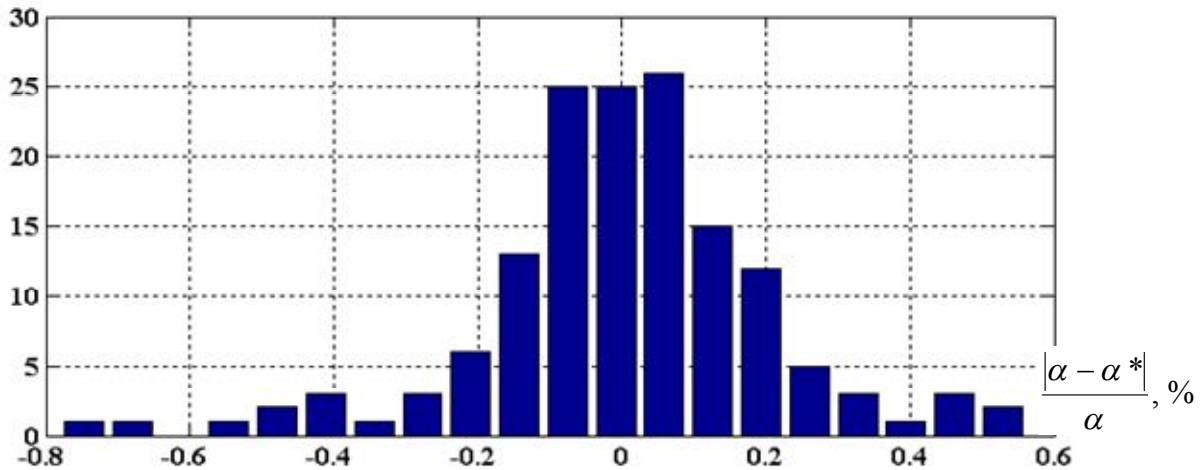


Рисунок 7 – Гистограмма распределения относительных ошибок аппроксимации a с помощью синтезированного нечеткого логического вывода

Знание такой аналитической зависимости позволяет выразить значение температуры масла, т.е. получить функцию зависимости температуры масла от N , F , w и α . Однако все эти значения носят мгновенный характер, актуальный для конкретного значения текущего времени τ . Для внедрения аргумента τ в выражение для температуры масла необходимо рассмотреть уравнение (2).

Оптимизация режима разогрева моторного масла. Используя уравнение (2), стало возможным получить выражение, описывающее динамику разогрева моторного масла в условиях особенностей «свободно-вынужденной» конвекции в реальном ДВС. Причем, за счет учета перемешивания системой орошения, температура масла принимается одинаковой по всему объему поддона. Решение для температуры масла представлено в виде выражения

$$t_m^\circ(\tau) = e^{-\tau \times g} \times \left[t_{\text{окр}}^\circ - \frac{\alpha \times F_{\text{п}} \times t_{\text{п}}^\circ(N) + K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} \times t_{\text{окр}}^\circ + \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}} \times t_{\text{окр}}^\circ}{\alpha \times F_{\text{п}} + K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} + \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}}} \right] + \left[\frac{\alpha \times F_{\text{п}} \times t_{\text{п}}^\circ(N) + K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} \times t_{\text{окр}}^\circ + \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}} \times t_{\text{окр}}^\circ}{\alpha \times F_{\text{п}} + K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} + \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}}} \right];$$

$$g = \frac{\alpha \times F_{\text{п}} + K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} + \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}}}{\sum c_{pi} \times m_i}$$
(11)

Примем в качестве критерия оптимальности [22, 23] управления минимизацию времени разогрева моторного масла в условиях динамического изменения варьируемых параметров w , N и F , при ограничении на максимальную мощность, подводимую на нагревательные элементы.

Тогда можно записать задачу оптимального управления в виде формального выражения

$$\tau_k = f(N, N_{\text{уд}}, U_c, I, t_{\text{окр}}^\circ, t_m^\circ, w, R_{\text{н}}, V, \rho, c_p, m, F, K_{\text{окр}}, \alpha(t_m^\circ, N, w, F)) \rightarrow \left\{ \begin{matrix} \min \\ \{w^*(\tau), F^*(\tau), N^*(\tau)\} \end{matrix} \right. ,$$
(12)

Для решения этой задачи выразим из (11) время разогрева масла и получим

$$\tau = -\sum c_{pi} \times m_i \times \ln \left[\frac{t_m^\circ(\tau) - \frac{\alpha \times F_{\text{п}} \times t_{\text{п}}^\circ(N) + K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} \times t_{\text{окр}}^\circ + \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}} \times t_{\text{окр}}^\circ}{\alpha \times F_{\text{п}} + K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} + \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}}}}{t_{\text{окр}}^\circ - \frac{\alpha \times F_{\text{п}} \times t_{\text{п}}^\circ(N) + K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} \times t_{\text{окр}}^\circ + \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}} \times t_{\text{окр}}^\circ}{\alpha \times F_{\text{п}} + K_{\text{окр}} \times F_{\text{п}} + \alpha_{\text{зм}} \times F_{\text{зм}}}} \right]$$
(13)

Примем, что решение для целевой функции (12) представляет собой именно законы управления (т.е. функции w , N и F зависят от времени τ или от температуры t_m). Тогда решение поставленной задачи классическими методами нелинейного программирования не приведет к достижению поставленной цели, так как получаемые значения w , N и F будут считаться оптимальными константами. Поэтому зависимость (11) рассматривается авторами как динамическая траектория роста температуры масла при фиксированных значениях w , N и F .

Будем рассматривать этот процесс как нарастающий в условиях фиксированного прироста по температуре (например, 1°C). Тогда можно говорить о возможности поиска оптимальных параметров w , N и F для текущего значения t_m , гарантирующих прирост в 1°C за минимальное время τ по формуле (13).

То есть минимизируется время разогрева на 1 °С при условии, что w , N и F равны оптимальным значениям, когда t_m начала разогрева = const. Реализация данного подхода гарантирует поиск множества оптимальных значений w , N и F , соответствующих температурам t_m начала разогрева масла, в виде дискретного набора значений: -50 °С, -49 °С, ...+20 °С. Иными словами, формирует дискретный закон управления процессом разогрева.

При поиске таких оптимальных значений w , N и F необходимо учитывать дополнительные ограничения

$$t_m^{\circ H} = t_{\text{окр}}^{\circ}, N(\tau) \leq N_{\text{зад}}^{\text{ТТЗ}}, F(\tau) \in \{f_i\}, w(\tau) \leq w(t_m^{\circ}, N), t_{\text{окр}}^{\circ} = \text{const} \quad (14)$$

В частности, подводимая к системе экстренного разогрева ДВС мощность распределяется между нагревательными элементами и электроприводом насоса системы орошения коленчатого вала ДВС. Исходя из результатов проведенных экспериментов была выявлена зависимость w от N и t_m° в виде выражения:

$$w = \frac{0,00001(t_m^{\circ})^3 + 0,0011(t_m^{\circ})^2 + 0,0528(t_m^{\circ}) + 1,9698}{N_{\text{нас_max}}} \times (N_{\text{max_сист}} - N),$$

где $N_{\text{max_сист}}$ – максимальная мощность, подаваемая на систему разогрева ДВС; $N_{\text{нас_max}}$ – максимальная мощность, потребляемая электрическим насосом орошения коленвала.

Если рассматривать описываемую задачу в рамках допущения о дискретности значений w , N и F , то ее можно исследовать в отношении поиска оптимальных законов управления процессом разогрева моторного масла (изменения параметров w , N и F) с помощью методов дискретного динамического программирования. При этом используется начальная точка в фазовом пространстве, совпадающая с $t_m^{\text{начальная}} = t_{\text{окр}}$ и конечная точка, обусловленная требуемой температурой масла t_m (например, +20 °С).

Обсуждение полученных результатов. Поскольку на стенде использовались датчики температуры с разрешающей способностью в 1 °С, то для поиска оптимального закона управления мощностью, площадью и скоростью потока масла было решено разбить процесс нагрева от « $t_m^{\text{начальная}}$ » до « $t_m^{\text{требуемая}}$ » на интервалы с шагом также в 1 °С. Для каждого такого выбранного интервала находились свои оптимальные значения w , N и F . На основе них (рис. 8) строилась оптимальная траектория управления процессом разогрева, которая может быть заложена в качестве алгоритма в контроллер управления режимами разогрева моторного масла. На рисунке 9 представлены графики зависимости времени разогрева ДВС при варьировании различными параметрами. На рисунках 10, 11, 12 – траектории управления при различном варьировании управляющих параметров и законы регулирования этих параметров, соответствующих оптимальному режиму управления.

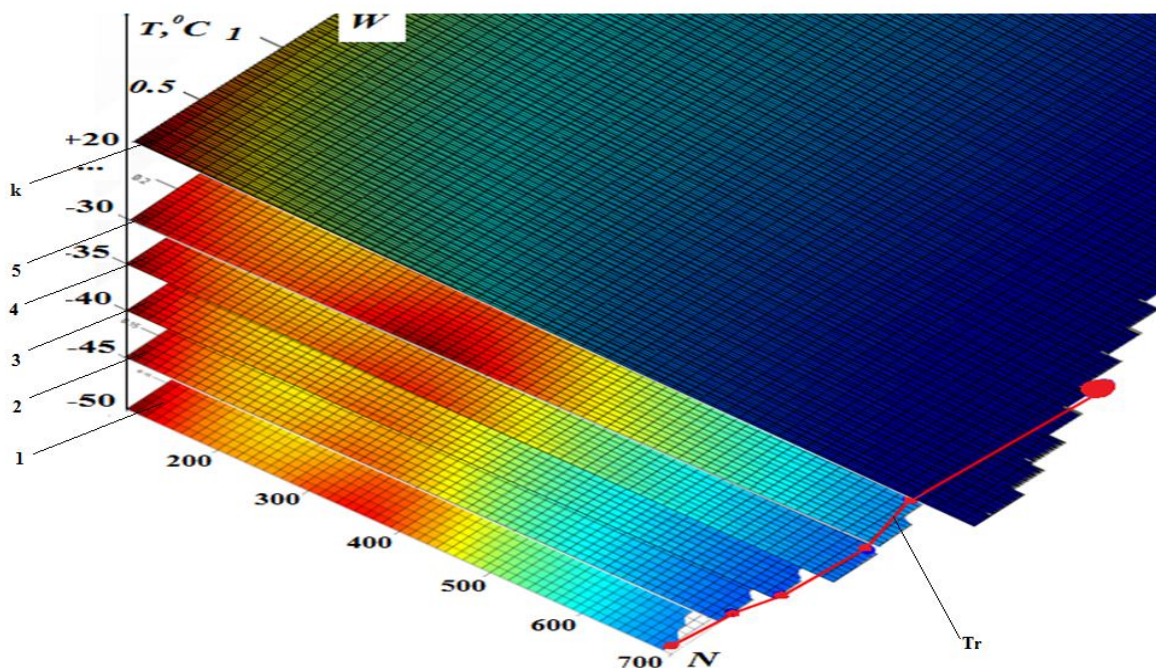


Рисунок 8 – Оптимальная траектория закона управления процессом разогрева в зависимости от влияния w и N на время разогрева масла (τ) на 1 °С при $F = \text{const}$: 1...k – слои, соответствующие времени разогрева на 1 °С от текущего (по вертикальной оси) в зависимости от параметров разогрева (N , w); Tr – сама оптимальная траектория закона управления

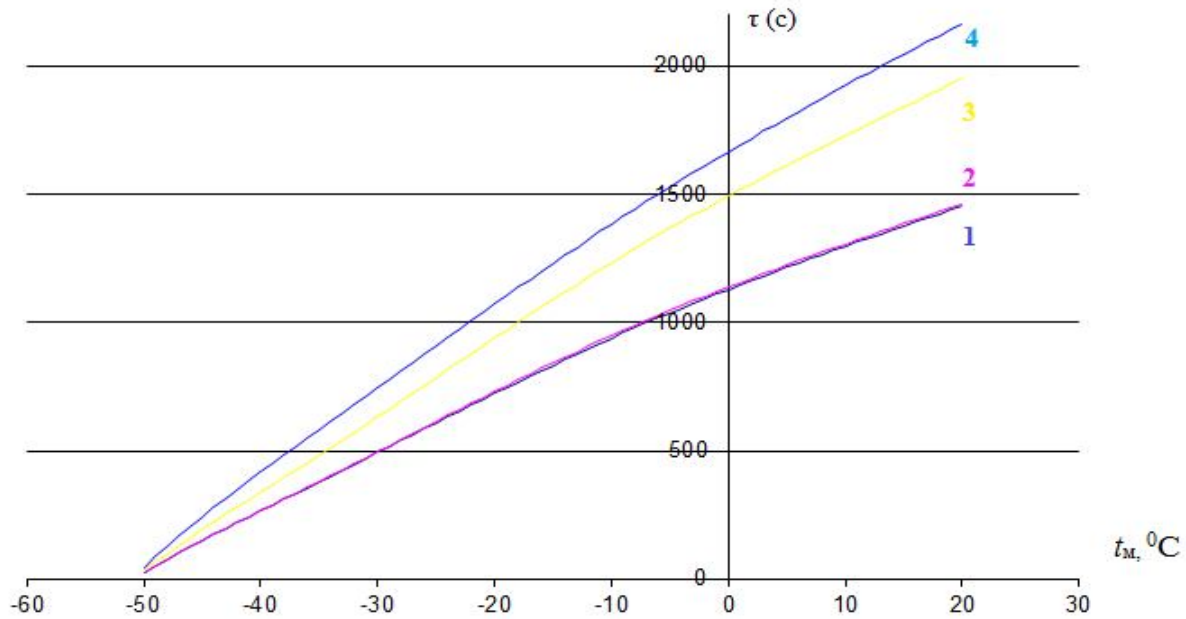


Рисунок 9 – График зависимости времени разогрева ДВС при варьировании различными параметрами: 1 – реализация оптимального режима (w^* , N^* , F^*); 2 – реализация режима при управлении только w^* и N^* ($F = \text{const} = 0,45$); 3 – реализация режима при управлении только w^* ($F = \text{const} = 0,45$; $N = \text{max}$); 4 – реализация режима при управлении только N^* ($F = \text{const} = 0,45$; $w = \text{max}$)

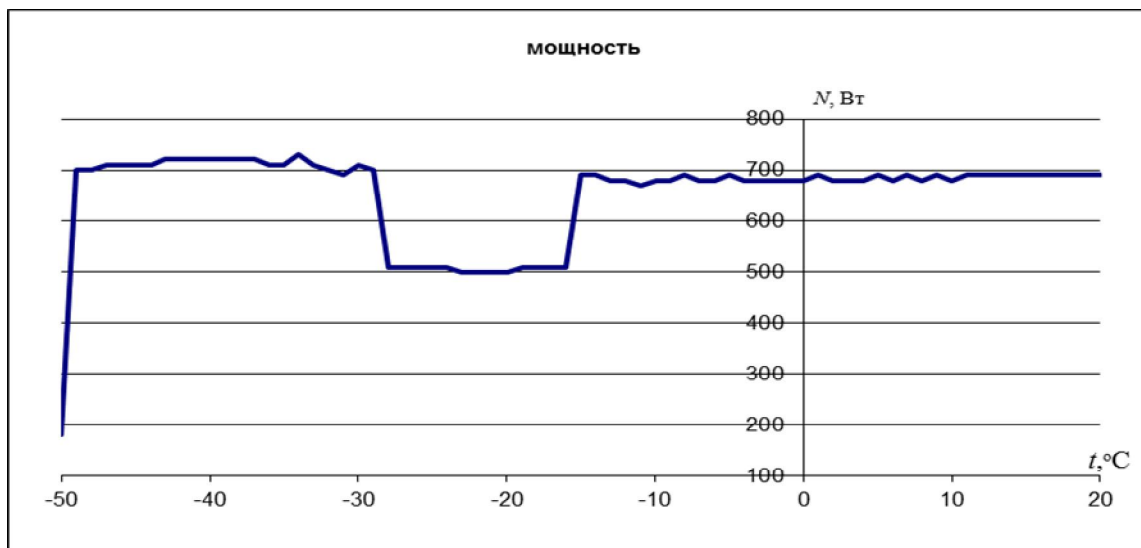


Рисунок 10 – Траектория управления мощностью, идущей на нагрев масла

Анализируя представленные графики и используя в качестве исходной информации лишь температуру окружающего воздуха и масла, можно управлять параметрами w , F и N . Это гарантирует минимальное время τ разогрева моторного масла до выбранной температуры. На графиках отчетливо видно скачкообразное изменение значений w и N , которые можно обосновать реально существующим наличием фазового перехода примесей масла, влияющих на его физико-химические свойства. Это подтверждает адекватность полученных законов управления процессом разогрева; принятых авторами допущений и ограничений при решении поставленной задачи.

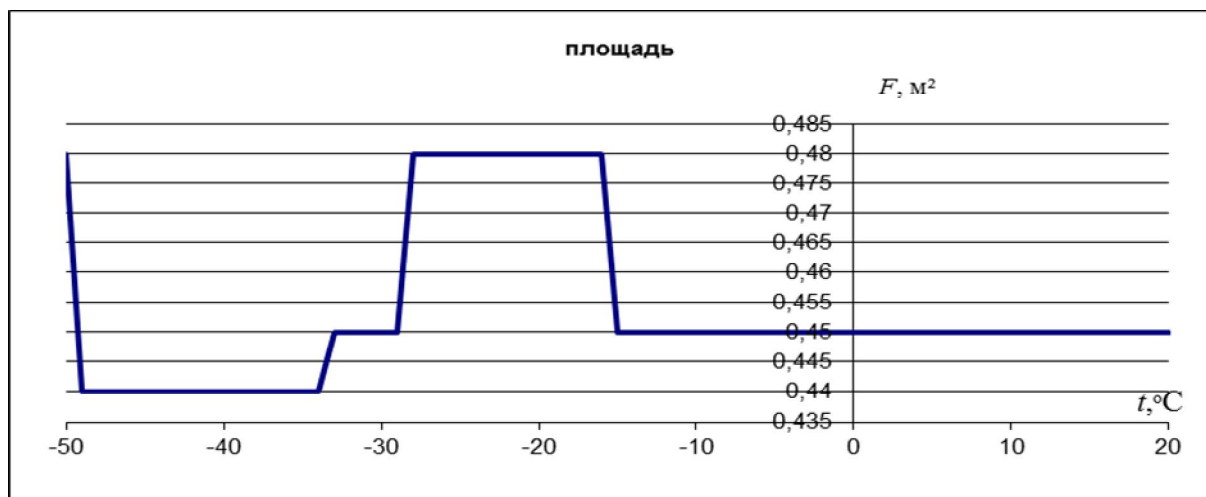


Рисунок 11 – Траектория управления площадью нагревательных элементов



Рисунок 12 – Траектория управления скоростью потока масла

Заключение. Таким образом, авторами было исследовано и обосновано следующее:

- при описании процесса разогрева масла в ДВС необходимо использовать законы теплообмена, содержание которых в реальности значительно отличается от классических;
- варьируемыми параметрами при реализации системы разогрева ДВС с помощью электрических нагревательных элементов могут выступать подаваемая на них мощность (N), их задействованная площадь (F) и скорость потока разогреваемого масла (w), формируемого с помощью электронасоса системы орошения коленчатого вала;
- при ограничении на максимальную подводимую к системе разогрева ДВС мощность задача управления процессом разогрева масла может быть сформулирована как задача на минимизацию времени разогрева с учетом динамического перераспределения подводимой к этой системе мощности между нагревательными элементами и электронасосом в условиях значительного изменения физико-химических свойств масла;
- для исследования этого процесса были предложены зависимости, описывающие такие изменения, полученные при реализации методов полиномиальной аппроксимации в области их известных значений (при температуре больше « -20 $^{\circ}\text{C}$ »);
- с помощью специализированного стенда был изучен процесс разогрева масла ДВС от « -50 $^{\circ}\text{C}$ » до « $+20$ $^{\circ}\text{C}$ » в рамках плана «факторного эксперимента»;
- получена модель описания значений коэффициента теплоотдачи в зависимости от w , t_m , N и F , реализованная с помощью контроллера нечеткого логического вывода, построенного по схеме Сугено;

- подстановка полученной модели для коэффициента теплоотдачи в уравнение динамики разогрева масла позволила получить зависимость времени разогрева от параметров w , t_m , N и F ;
- при фиксированном значении t_m и $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ это позволило найти оптимальные зависимости изменения w , N и F с помощью решения задачи динамического программирования;
- анализ полученных зависимостей позволяет говорить об их адекватности, так как полученные законы описывают также особенности перехода масла из одного агрегатного состояния в другое (в районе « -30°C »).

Список литературы

1. Брюханов О. Н. Теплообмен / О. Н. Брюханов, С. Н. Шевченко. – Москва : ИНФРА-М, 2013. – 464 с.
2. Джамбеков А. М. Использование информационных технологий для обеспечения автоматизированного управления процессом каталитического риформинга в условиях неопределенности / А. М. Джамбеков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 2. – С. 36–46.
3. Дорохов А. Ф. Обработка информации и управление температурным режимом рабочего цилиндра двигателя внутреннего сгорания судового дизеля / А. Ф. Дорохов, Н. В. Пахомова, Г. А. Попов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 2. – С. 137–150.
4. Ковальков Д. А. Теория поиска и принятия решений / Д. А. Ковальков, Д. А. Чистопрудов. – Серпухов : филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, 2016. – 304 с.
5. Лыков А. В. Теплообмен: Справочник / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1972. – 560 с.
6. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – Москва : Энергия, 1977. – 247 с.
7. Никитин А. В. Расчёт параметров устройства для предпускового подогрева и непрерывного поддержания требуемой температуры картерного масла ходового двигателя агрегата подвижного грунтового ракетного комплекса / А. В. Никитин, С. А. Савочкин // Транспортные средства специального назначения: разработка, производство и модернизация : мат-лы науч.-практ. конф. – Омск : ОАБИИ, 2017. – С. 172–177.
8. Никитин А. В. Математическая модель определения параметров системы непрерывного поддержания температуры масла ходового двигателя / А. В. Никитин // Известия. – 2018. – № 1 (47). – С. 26–31.
9. Никитин А. В. Методика экспериментального определения коэффициента теплоотдачи в поддоне двигателя при подогреве масла внешним электронагревательным устройством / А. В. Никитин, Д. А. Чистопрудов // Сборник трудов XXXVII ВНТК. – Серпухов : филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, 2018. – Ч. 4. – С. 256–261.
10. Никитин А. В. Идентификация тепловых процессов в поддоне картера двигателя специального транспортного средства с помощью нейронечетких математических моделей / А. В. Никитин, Д. А. Чистопрудов, С. П. Столяревский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – № 3 (122). – С. 153–163.
11. Никитин В. А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учеб. пос. / В. А. Никитин, С. В. Бойко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Оренбург, 2004. – 462 с.
12. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипова. – Москва : Энергия, 1979. – 319 с.
13. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / В. М. Попов. – Москва : Энергия, 1971. – 216 с.
14. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / В. Г. Блохин, О. П. Глудкин, А. И. Гуров, М. А. Ханин ; под ред. О. П. Глудкина. – Москва : Радио и связь, 1997. – 232 с.
15. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / под ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 510 с.
16. Пат. 121864 Российская Федерация. Устройство для предпускового подогрева картерного масла двигателя внутреннего сгорания ; 10.10.2012.
17. Пат. 133201 Российская Федерация. Устройство для предпускового подогрева картерного масла двигателя внутреннего сгорания ; 10.10.2013.
18. Чистопрудов Д. А. Основы компьютерного проектирования и моделирования радиотехнических систем : учеб. пос. / Д. А. Чистопрудов, Д. А. Ковальков. – Серпухов, ФВА РВСН, 2016. – 384 с.
19. Чистопрудов Д. А., Ковальков Д. А. Системы искусственного интеллекта. Исследование методов искусственного интеллекта при решении различных задач : учеб. пос. / Д. А. Чистопрудов, Д. А. Ковальков. – Серпухов, СВИ РВ, 2011. – 99 с.
20. Чистопрудов Д. А. Решение задачи краткосрочного прогнозирования динамики изменения временного ряда методом нечеткого логического вывода / Д. А. Чистопрудов, Д. А. Ковальков, А. А. Кузьмин // Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем : тр. 32 Всерос. науч. техн. конф. – Серпухов : ФВА РВСН, 2013. – Ч. 5. – С. 242–247.
21. Чистопрудов Д. А. Применение аппарата нечеткого логического вывода в предсказывающих системах / Д. А. Чистопрудов, А. А. Кузьмин // Сб. тр. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. учащихся и студентов. – Протвино : Управление образования и науки, 2014. – Ч. 2. – С. 87–90.
22. Чистопрудов Д. А. Эффективность применения нечетких моделей по отношению к параметрическим в отдельных вопросах из радиотехники / Д. А. Чистопрудов, Д. А. Ковальков, М. А. Тебякина // Информационные технологии в образовании, науке и производстве : сб. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. – Серпухов, 2010. – Ч. 2. – С. 277–279.

23. Чистопрудов Д. А. Применение нейросетевых технологий для решения задачи оптимизации на сетях связи / Д. А. Чистопрудов, Д. А. Ковальков, И. А. Устинов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – Москва : Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», 2008. – № 1. – С. 111–113.
24. Bellman R. E. On the analytical of fuzzy sets / R. E. Bellman, M. Giertz // Sciences. – 1975. – Vol. 5. – P. 149–156.
25. Zadeh L. J. Fuzzy Sets / L. J. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338–353.

References

1. Bryukhanov O. N., Shevchenko S. N. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow, INFRA-M Publ., 2013. 464 p.
2. Jambekov A. M. Ispolzovanie informatsionnykh tekhnologii dlya obespecheniya avtomatizirovannogo upravleniya processom kataliticheskogo riforminga v usloviyakh neopredelennosti [Use of information technologies to provide automated control over the process of catalytic reforming in conditions of uncertainty]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 2, pp. 36–46.
3. Dorokhov A. F., Pakhomova N. V., Popov G. A. Obrabotka informatsii i upravlenie temperaturnym regimom rabocheho tsilindra dvigatelya vnutrennego sgoraniya sudovogo dizelya [Information processing and controlling the temperature mode of the working cylinder of the internal combustion engine of the ship diesel] *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 2, pp. 137–150.
4. Kovalkov D. A., Chistoprudov D. A. *Teoria poiska i prinytia resheniy* [Theory of search and decision-making]. Serpukhov, Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter The Great Publ., 2016. 304 p.
5. Lykov A. V. *Teplomassoobmen: Spravochnik* [Heat and mass transfer: A handbook]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 560 p.
6. Mikheev M. A. *Osnovy teploperedachy* [Fundamentals of heat transfer], Moscow, Energiya Publ., 1977. 247 p.
7. Nikitin A. V., Savochkin S. A. Raschet parametrov ustroystva dlya predpuskovogo podogreva i neprerivnogo podderganiya trebuemoy tempratury karternogo masla khodovogo dvigatelya agregata podvizhnogo gruntovogo raketnogo kompleksa [Calculation of the device parameters for preheating and continuous maintenance of the required crankcase oil temperature of the propulsion engine of the mobile ground rocket complex]. *Transportnie sredstva spetsialnogo naznacheniya: razrabotka, proizvodstvo i modernizatsiya : materialy nauchno-practicheskoy konferentsii* [Vehicles of special purpose: development, production and modernization : Proceedings of scientific-practical conference]. Omsk, 2017, pp. 172–177.
8. Nikitin A. V. Matematicheskaya model opredeleniya parametrov sistemy nepreryvnogo podderganiya tempratury khodovogo dvigatelya [Mathematical model for determining the parameters of the system of continuous maintenance of the oil temperature of the running engine]. *Izvestia* [News], 2018, no. 1 (47), pp. 26–31.
9. Nikitin A. V., Chistoprudov D. A. *Metodika eksperimentalnogo opredeleniya koefitsienta teplootdachi v poddone dvigatelya pri podogreve masla vneshnim elektronagrevatelnim ustroystvom* [The method of experimental determination of the heat transfer coefficient in the engine pallet when the oil is heated by an external electric heating device]. *Sbornik trudov XXXVII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings XXXVII of All-Russian Scientific Technical Conference]. Serpukhov, Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter The Great Publ., 2018, part 4, pp. 256–261.
10. Nikitin A. V., Chistoprudov D. A., Stolyarevskiy S. P. Identifikatsiya teplovykh processov v poddone kartera dvigatelya spetsialnogo transportnogo sredstva s pomoshchyu neyronechetkikh matematicheskikh modeley [Identification of thermal processes in the oil sump of the engine special vehicles by using neuro mathematical models]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of R. E. Alekseev NSTU]. Nizhny Novgorod, 2018, no. 3 (122), pp.153-163.
11. Nikitin V. A., Boyko S. V., *Metody i sredstva izmereniy, ispitaniy i kontrolya* [Methods and means of measurement, testing and control], 2nd ed. rev. and add. Orenburg, 2004. 462 p.
12. Osipova V. A. *Eksperimentalnoe issledovanie protsessov teploobmena* [Experimental study of heat transfer processes]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 319 p.
13. Popov V. M. *Teploobmen v zone kontakta razemnykh i nerazemnykh soedineniy* [Heat exchange in the contact zone of detachable and all-in-one connections]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 216 p.
14. Blokhin V. G., Gludkin O. P., Gurov A. I., Khanin M. A. *Sovremennyy eksperiment: podgotovka, provedenie, analiz rezultatov* [Modern experiment: preparation, conduction, analysis of the results]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1997, 232 p.
15. Grigoriev V. A., Zorin V. M. *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskiiy eksperiment: Spravochnik* [Heat and mass transfer. Thermal engineering experiment: a Handbook]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 510 p.
16. Patent 121864 Russian Federation. Device for preheating the crankcase oil of an internal combustion engine ; 10.10.2012.
17. Patent 133201 Russian Federation. Device for preheating the crankcase oil of an internal combustion engine ; 10.10.2013.
18. Chistoprudov D.A., Kovalkov D. A. *Osnovy kompyuternogo proektirovaniya i modelirovaniya radiotekhnicheskikh sistem : uchebnoe posobie* [Fundamentals of computer design and modeling of radio engineering systems : textbook] Serpukhov, Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter The Great Publ., 2016. 384 p.
19. Chistoprudov D.A., Kovalkov D.A. *Sistemy iskusstvennogo intellekta. Issledovanie metodov iskusstvennogo intellekta pri reshenii razlichnykh zadach : uchebnoe posobie* [Systems of artificial intelligence. Research of methods of artificial intelligence in solving various problems : textbook]. Serpukhov, Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter The Great Publ., 2011. 99 p.
20. Chistoprudov D. A., Kovalkov D. A., Kuzmin A. A. *Reshenie zadachi kratkosrochnogo prognozirovaniya dinamiki izmeneniya vremennogo ryada metodom nechetkogo logicheskogo vyvoda* [The solution of the problem of short-term forecasting of the dynamics of the time series change by the method of fuzzy inference]. *Problemy effektivnosti i bezopasnosti funkcionirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh i informatsionnykh sistem : trudy 32 Vserossiyskoy nauchno-*

tekhnicheskoy konferentsii [Problems of efficiency and security of functioning complex technical and information systems : proceedings of the 32nd All-Russian scientific technical conference]. Serpukhov, Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter The Great Publ., 2013, part 5, pp. 242–247.

21. Chistoprudov D. A., Kuzmin A. A. *Primenenie apparata nechetkogo logicheskogo vyvoda v predskazyvauchikh sistemakh* [The use of the apparatus of fuzzy inference in prediction systems]. *Sbornik trudov 7-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii uchashchikhsya i studentov* [Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference of Pupils and Students]. Protvino, Department of Education and Science Publ., 2014, part 2, pp. 87–90.

22. Chistoprudov D. A., Kovalkov D. A., Tebyakina M. A. *Effektivnost primeneniya nechetkikh modelei po otnosheniyu k parametricheskim v otдельnykh voprosakh iz radiotekhniki* [Efficiency of application of fuzzy models in relation to parametric in separate questions from radio engineering]. *Informatsionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i proizvodstve : sbornik trudov 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Information Technologies in Education, Science and Production : Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference]. Serpukhov, 2010, part 2, pp. 277–279.

23. Chistoprudov D. A., Kovalkov D. A., Ustinov I. A. *Primenenie neurosetevykh tekhnologiy dlya resheniya zadachi optimizatsii na setyakh svyazi* [Application of neural network technologies to solve the optimization problem on communication networks]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information Technologies in Design and Production]. Moscow, Scientific and Technical Center of the Defense Complex “Compass”, 2008, no. 1, pp. 111–113.

24. Bellman R. E., Giertz M. On the analytical of fuzzy sets. *Sciences*, 1975, vol. 5, pp. 149–156.

25. Zadeh L. J. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, pp. 338–353.

УДК 004.81

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ ГЕНЕРАЦИИ МУЗЫКАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ¹

Статья поступила в редакцию 08.11.2018, в окончательном варианте – 17.11.2018.

Никитин Никита Андреевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, аспирант, e-mail: set.enter@mail.ru

Розалиев Владимир Леонидович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0002-7372-8364, e-mail: vladimir.rozaliev@gmail.com

Орлова Юлия Александровна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, кандидат педагогических наук, доктор технических наук, доцент, ORCID 0000-0003-4854-7462, e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Заболеева-Зотова Алла Викторовна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0003-1918-667X, e-mail: zabzot@gmail.com

Цель исследования, описанного в данной статье, – увеличение гармоничности и мелодичности генерации звуков по изображению. Проведена разработка метода, реализующего комбинированный подход в генерации звуковых последовательностей. Предложенный метод использует рекуррентную нейронную сеть для генерации музыкального материала и цветомузыкальную теорию, которая используется для определения параметров композиции по изображению. Описана разработанная программа, предназначенная для генерации звуков по изображению. В ее основе лежит разработанный авторами метод, а также использование языков Python и библиотека Keras. Приведены результаты экспериментов, которые показывают высокую эффективность комплексного использования методов машинного обучения и светозвуковой теории для задачи генерации звуков по изображению.

Ключевые слова: рекуррентная нейронная сеть, цветомузыкальная теория, Keras, автоматизированная генерация музыки, схемы соотнесения цветов и нот, анализ изображений

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17-07-01601, 17-29-07021, 18-07-00220).