

УДК 629.113.004

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-251-9-85-95

А.Л. Севостьянов, С.И. Головин, Р.А. Булавинцев

A.L. Sevostyanov, S.I. Golovin, R.A. Bulavintsev

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДВС ПО ХИММОТОЛОГИЧЕСКОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ МОТОРНОГО МАСЛА

### DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PRODUCT TO EVALUATE THE REMAINING LIFE OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE BASED ON THE CHEMMOTOLOGY INDEX OF ENGINE OIL

**Ключевые слова:** прогнозирование, остаточный ресурс, двигатель внутреннего сгорания, диагностика, моторное масло, железо, программный продукт.

Прогнозирование остаточного ресурса двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является ключевой задачей для повышения надежности, снижения эксплуатационных затрат и предотвращения отказов техники. Представлен метод оценки остаточного ресурса ДВС на основе анализа содержания железа в моторном масле, который сочетает аппаратные средства, математические модели и программное обеспечение. Основу метода составляет сравнение потенциальной и фактической массы железа в смазочной системе двигателя. Потенциальная масса рассчитывается по линейным зависимостям, учитывающим время работы и конструктивные особенности двигателя (например, для ЯМЗ-238:  $Fe_n = 0.0686T + 2.92$ ). Фактическая масса определяется с помощью датчиков, измеряющих концентрацию металлических частиц в масле. Разработанный программный продукт, реализованный на платформе ПК с использованием языков C++ и Delphi, автоматизирует процесс сравнения данных, вычисления остаточного ресурса и вывода рекомендаций по техническому обслуживанию. Результаты испытаний показали, что метод позволяет точно оценивать интенсивность износа и прогнозировать ресурс двигателя в реальных условиях эксплуатации. Система также учитывает возможность оптимизации режимов работы для продления срока службы ДВС. Преимуществами предложенного решения являются простота использования, адаптивность к различным маркам двигателей и интеграция с современными диагностическими системами. Исследование вносит вклад в развитие методов диагностики ДВС, предлагая практический инструмент для мониторинга их состояния и планирования ремонтов. Разработанный подход может быть применен в агропромышленном

комплексе и других отраслях, где используется техника с ДВС.

**Keywords:** forecasting, remaining life, internal combustion engine, diagnostics, engine oil, hardware, software product.

Predicting the remaining life of internal combustion engines (ICE) is a key task for improving reliability, reducing operating costs and preventing equipment failures. This paper discusses a method for evaluating the remaining life of an internal combustion engine based on iron content test in engine oil which combines hardware, mathematical models and software. The method is based on the comparison of the potential and actual mass of iron in the engine lubrication system. The potential mass is calculated using linear relationships that take into account the operating time and design features of the engine (for example, for YaMZ-238:  $Fe = 0.0686T + 2.92$ ). The actual mass is determined using sensors that measure the concentration of metal particles in the oil. The developed software product implemented on a PC platform using C++ and Delphi languages automates the process of comparing the data, calculation of the remaining life and output of maintenance recommendations. The test results showed that the method made it possible to accurately evaluate the wear rate and predict engine life under real operating conditions. The system also takes into account the possibility of optimizing operating modes to extend the service life of the internal combustion engine. The advantages of the proposed solution are ease of use, adaptability to various engine brands and integration with modern diagnostic systems. The research contributes to the development of internal combustion engine diagnostic methods offering a practical tool for monitoring their condition and planning repairs. The developed approach may be applied in the agro-industrial complex and other industries where equipment with internal combustion engines is used.

**Севостьянов Александр Леонидович**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: sewostya@list.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8555-5678>.

**Sevostyanov Aleksandr Leonidovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Orel State Agricultural University, Orel, Russian Federation, e-mail: sewostya@list.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8555-5678>.

**Головин Сергей Иванович**, к.т.н., доцент, декан факультета агротехники и энергообеспечения, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: golovinsi@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-8138-8458>.

**Булавинцев Роман Алексеевич**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой механизации технологических процессов в агропромышленном комплексе, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: bulavintcevro@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7520-0849>.

**Golovin Sergey Ivanovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Dean, Dept. of Agricultural Engineering and Energy Supply, Orel State Agricultural University, Orel, Russian Federation, e-mail: golovinsi@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-8138-8458>.

**Bulavintsev Roman Alekseevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Orel State Agricultural University, Orel, Russian Federation, e-mail: bulavintcevro@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7520-0849>.

## Введение

Прогнозирование остаточного ресурса двигателей внутреннего сгорания является критически важной задачей в обеспечении надежности силовых энергетических установок тракторов и автомобилей (далее – ДВС), снижении эксплуатационных затрат и предотвращения ресурсного отказа. Под остаточным ресурсом понимается продолжительность нормальной работы ДВС от текущего момента до достижения предельного состояния, определяемого техническими нормативами или экономической целесообразностью [1]. Актуальность этой задачи обусловлена сложностью физических процессов износа, многофакторностью деградиционных механизмов и стохастичностью условий эксплуатации. Современные подходы к прогнозированию остаточного ресурса эволюционировали от экспертных оценок и статистических моделей к сложным гибридным системам, интегрирующим физические принципы, машинное обучение и многомерный анализ данных. Исторически первые методы оценки ресурса ДВС основывались на статистических моделях и корректировке нормативов в зависимости от условий эксплуатации. В российских исследованиях 1980-2000-х годов, такие как работа В.В. Болотина [2], заложены основы нормирования ресурса. Ресурс рассматривается как случайная величина, описываемая функциями распределения наработки до предельного состояния. Средний ресурс  $t_{cp}$  вычислялся как математическое ожидание:

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} t \times f(t) dt,$$

где  $f(t)$  – плотность распределения наработки до отказа.

Для ответственных узлов, агрегатов и систем ДВС предлагалось использование  $\gamma$ -процентного ресурса  $t_{\gamma}$ , гарантирующего заданную вероятность безотказной работы. Однако эти методы не учитывали индивидуальные особенности эксплуатации конкретного двигателя, что приводило к недоиспользованию ресурса у 40-50% изделий. Корректировка нормативов технического обслуживания (ТО) на основе условий эксплуатации стала шагом вперед. Исследователи в работе [3] показали, что система технического обслуживания и ремонта техники, основанная на наработке, не коррелируется с реальной нагрузкой ДВС. Экспериментально установлено, что такие факторы, например, работа на холостом ходу или при низких температурах, увеличивают интенсивность износа до 30% по сравнению со стандартными условиями. Разработанная математическая модель интенсивности износа учитывает нагрузку и частоту вращения коленчатого вала ДВС, являясь одними из критериев для прогнозирования ресурса [3].

Для описания нелинейного изнашивания ДВС широко применяются модели на основе винеровского процесса. В работе [4] предложен нелинейный винеровский процесс с непрерывным временем

$$X(t) = X(t_0) + \alpha \int_0^t \mu(\tau, \beta) d\tau + \sigma_b B(t),$$

где  $X(t)$  – степень изнашивания в момент времени  $t$ ;

$X(t_0)$  – начальное состояние;

$\alpha$  – коэффициент, отражающий индивидуальные особенности двигателя;

$\mu(\tau, \beta)$  – нелинейная функция времени  $t$ , которая используется для описания нелинейных

характеристик ухудшения характеристик двигателя;

$B(t)$  – стандартное броуновское движение, которое используется для описания случайных флуктуаций;

$\sigma_b$  – коэффициент диффузии.

Данные модели имеют ограниченную точность, так как изнашивание ДВС определяется множеством взаимосвязанных параметров. Решением стала R-Vine Copula, впервые примененная для прогнозирования остаточного ресурса авиадвигателей в 2023 г. [5]. Этот метод моделирует многомерные зависимости между признаками изнашивания без предположений об их линейной корреляции. Структура зависимостей описывается с помощью иерархии парных копул, что позволяет учесть асимметрию в распределениях [5].

С развитием сенсорных систем и вычислительных возможностей доминирующими стали методы, основанные на глубоком обучении. Их преимущество – в способности автоматически извлекать признаки из многомерных временных рядов без априорных знаний о физических процессах изнашивания [5, 6]. Гибридные модели объединяют физические принципы с глубоким обучением и адаптивностью к смене режимов изнашивания [7]. Например, при переходе от стационарного режима терния к абразивному изнашиванию. Работы [1-7] описывают стохастические модели прогнозирования остаточного ресурса ДВС. В данной работе предлагается оценивать состояние ДВС, прогнозировать его ресурс и оптимизировать техническое обслуживание для продления срока эксплуатации по химмотологическому показателю [8-10].

**Цель** исследования – разработка программного продукта для прогнозирования остаточного ресурса ДВС на основе анализа содержания железа в моторном масле, обеспечивающего высокую точность, простоту использования современными компьютерными системами.

### Материалы и методы исследования

При разработке программного продукта для прогнозирования остаточного ресурса двигате-

лей внутреннего сгорания реализован комплексный подход, сочетающий аппаратные средства, программные решения и математические модели [11]. В качестве основного материала исследования выступали данные о содержании железа в моторном масле, полученные от датчиков, установленных на ДВС различных марок. Для сбора информации использовались серийно выпускаемые датчики контроля содержания металлов в масле, совместимые с современными системами и средствами диагностирования. В качестве объектов исследования были выбраны двигатели заводом ЯМЗ и ТМЗ как наиболее распространенные в отечественном двигателестроении. Для этих двигателей были заранее определены эталонные показатели износа, полученные в ходе длительных эксплуатационных испытаний [8].

Основой методологического подхода стало сравнение потенциальной и фактической массы железа в смазочной системе ДВС. Потенциальная масса железа рассчитывалась на основе математических моделей, учитывающих время работы двигателя и его конструктивные особенности для различных двигателей. Например, для двигателя СМД-62 применялась априорная линейная зависимость  $Fe_n = 0,0593T + 5,5537$ , для ЯМЗ-238 –  $Fe_n = 0,0686T + 2,92$ , где  $T$  – время работы двигателя в моточасах.

Фактическая масса железа определялась с помощью датчиков, установленных в масляной системе, которые непрерывно измеряли концентрацию металлических частиц в моторном масле. Сравнение этих показателей позволяло оценить интенсивность износа и сделать выводы об условиях эксплуатации двигателя.

Программная часть исследования включала разработку специализированного обеспечения для обработки поступающих данных. В качестве платформы был выбран персональный компьютер с операционной системой MS Office 2016, процессором Intel Core i3, оперативной памятью объемом 4 Гб. Устройства ввода и вывода информации: монитор, клавиатура, компьютерная мышь – совмест. ПК.

Архитектура программного продукта предусматривала модульную структуру, включающую блок ввода данных, базу знаний, вычислительный модуль и интерфейс пользователя. Для реализации алгоритмов использовались языки программирования C++ и Delphi, обеспечивающие необходимую производительность и совместимость с различными версиями операционных систем. Особое внимание уделялось созданию интуитивно понятного интерфейса, не требующего специальной подготовки от пользователя [11].

Математическая модель обработки данных основывалась на теории изнашивания деталей двигателя и учитывала изменение геометрии трущихся поверхностей в процессе эксплуатации. Для каждого типа двигателя были разработаны индивидуальные зависимости, описывающие закономерности распределения железа по элементам смазочной системы. Алгоритм работы программы включал последовательное выполнение операций: ввод информации о марке двигателя и его наработке, сбор данных с датчиков, расчет потенциальной и фактической массы железа, сравнение полученных значений и вычисление остаточного ресурса. В случае обнаружения значительных отклонений фактических показателей от расчетных система формировала предупреждение о необходимости технического вмешательства.

Для проверки достоверности результатов использовались методы статистического анализа. Собранные данные подвергались обработке с определением средних значений, дисперсии и доверительных интервалов. Корреляционный анализ позволял установить степень влияния различных факторов эксплуатации на интенсивность износа. Важной частью исследования стали испытания программного продукта в реальных условиях работы двигателей. Тестирование проводилось на нескольких десятках двигателей в различных режимах эксплуатации, что позволило проверить устойчивость алгоритмов к изменяющимся условиям и уточнить расчетные коэффициенты.

Методика оценки остаточного ресурса предусматривала два сценария: расчет при текущих условиях эксплуатации и прогноз при приведении параметров работы к оптимальным значениям, рекомендованным заводом-изготовителем. Это позволяло не только констатировать фактическое состояние двигателя, но и оценивать потенциальный эффект от проведения регламентных работ. Для визуализации результатов использовались графические формы отображения информации, включая диаграммы изменения содержания железа во времени и индикаторы остаточного ресурса.

Особенностью разработанного метода стала его адаптивность к различным маркам двигателей. База данных программного продукта содержит параметры для нескольких десятков моделей ДВС, что позволяло легко масштабировать систему для использования на разных типах техники. При этом архитектура программы предусматривала возможность дополнения базы данных новыми моделями двигателей без необходимости изменения основного алгоритма работы. Для обеспечения долговременной работы системы была реализована функция архивирования данных, позволяющая сохранять историю измерений и проводить ретроспективный анализ изменения параметров двигателя.

Важным аспектом исследования стала разработка методики калибровки датчиков и верификации получаемых данных. Погрешность измерений контролировалась путем периодического сравнения показаний датчиков с результатами лабораторного анализа проб моторного масла. Это позволяло поддерживать высокую точность измерений на протяжении всего срока эксплуатации системы. Для обработки сигналов с датчиков применялись цифровые фильтры, устраняющие случайные помехи и выделяющие полезный сигнал. Особое внимание уделялось вопросам синхронизации данных, поступающих от различных источников, что обеспечивало согласованность временных меток при последующем анализе.

Методологическая база исследования включала анализ существующих разработок в обла-



сти диагностики двигателей, в том числе решений зарубежных компаний, таких как AVL. Это позволило учесть мировой опыт при создании собственного продукта и избежать типичных ошибок, допускаемых при разработке подобных систем. Одновременно были сохранены и развиты преимущества отечественного подхода к диагностике, в частности, акцент на простоте использования и адаптации к специфическим условиям эксплуатации техники в агропромышленном комплексе России.

### Результаты и их обсуждение

Для решения задач об оценке условий эксплуатации ДВС и определении остаточного ресурса по удельному химмотологическому показателю предложена следующая схема функционирования программного продукта (рис. 1), в которой предусмотрена база данных, а также возможность постоянного мониторинга.

Мониторинг производится по следующей схеме (рис. 1):

- ввод информации о марке двигателя – позиция 1;
- поступление информации о фактической наработке – позиция 2;
- сбор информации о наработке ДВС до последней замены моторного масла, период работы масла – позиция 3;
- сбор информации от датчика о содержании железа в масле – позиция 4.

Вся вышеуказанная информация вводится в персональный компьютер через интерфейс. Далее программный продукт работает по следующей схеме:

- 5, 6 – база данных по маркам двигателей;
- в позиции 8 (рис. 1) аккумулируется информация позиций 1, 2. Используя информацию позиций 5, 6 (база данных), разработанный программный продукт вычисляет потенциальную массу железа в смазочной системе ДВС;
- в позиции 7 аккумулируется информация позиций 3, 4 и по разработанному программному

продукту вычисляется фактическая масса железа в смазочной системе ДВС;

- в позиции 9 производится оценка условий эксплуатации двигателя путем сравнения потенциальной массы железа и фактической;
- в позиции 10 вычисляется остаточный ресурс двигателя.

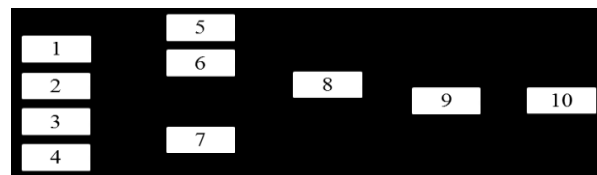


Рис. 1. Блок-схема функционирования программного продукта [11]

В случае если условия эксплуатации двигателя не были восстановлены после оперативно-го вмешательства, направленного на устранение повышенного изнашивания, операции повторяются, и мастером-диагностом выявляются причины. Алгоритм программного продукта (рис. 2) основан на сравнении потенциальной и фактической массы железа в смазочной системе двигателя. Потенциальную массу железа в смазочной системе ДВС определяют при помощи средств обработки информации при функционировании программного обеспечения, разработанной на основе теории изнашивания, установленных зависимостей изнашивания деталей двигателя (изменения геометрии деталей двигателя в процессе их работы) и базы данных, содержащей необходимые для этой цели показатели. Определение фактической массы производится с помощью специального датчика, установленного на двигателе. Сравнение этих двух показателей позволяет получить данные об условиях эксплуатации, на основе которых, в дальнейшем, происходит вычисление остаточного ресурса. Причем, остаточный ресурс указывается при эксплуатации двигателя в существующих условиях и при их приведении в соответствие с предусмотренными заводом-изготовителем.

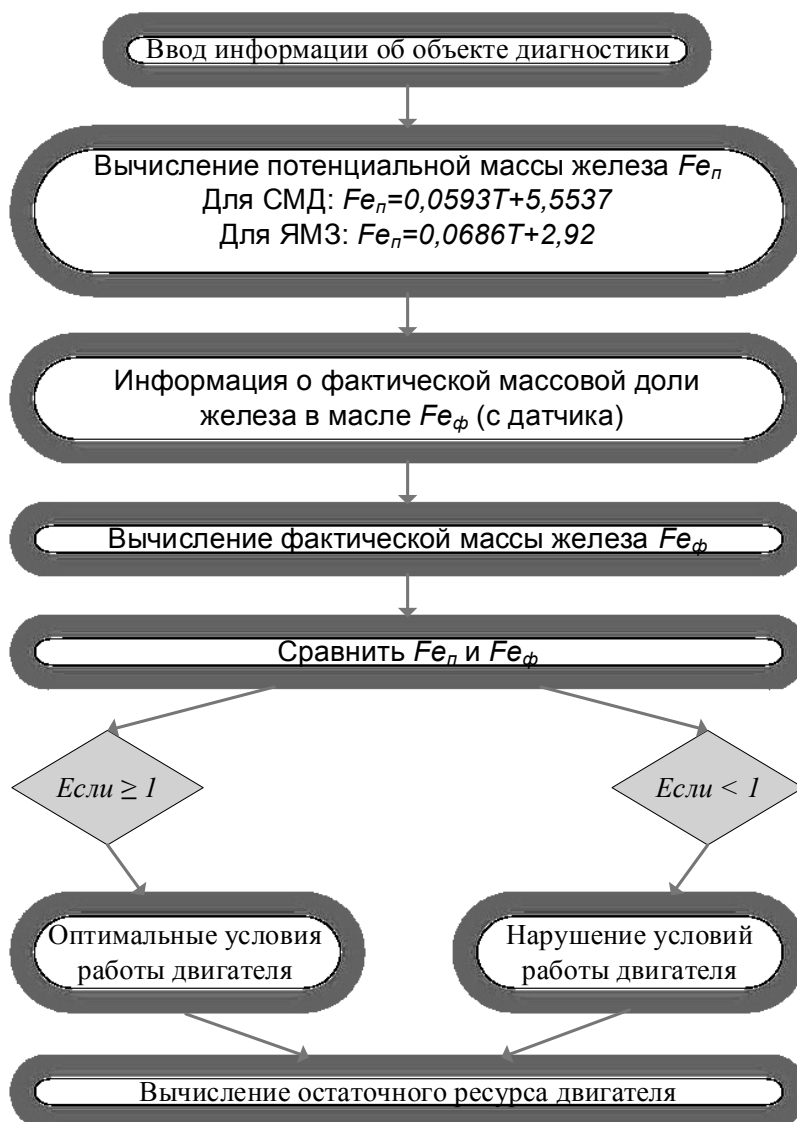


Рис. 2. Модель (алгоритм) работы программного продукта [8]

Для реализации модели алгоритма работы программного продукта был разработан программный код (Листинг программы на ЭВМ):

```

unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls;
type
  TForm1 = class(TForm)
    Label1: TLabel;
    Button1: TButton;
    Button2: TButton;
    Edit4: TEdit;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;

```

```

    Edit5: TEdit;
    RadioGroup1: TRadioGroup;
    Label4: TLabel;
    Edit7: TEdit;
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
  private
    {Private declarations}
  public
    {Public declarations}
  end;
  var
    Form1: TForm1;
  implementation
    {$R *.dfm}
    procedure TForm1.Button2Click(Sender:
      TObject);
  var

```

```

o_r,t_p,koe,fe_1,fe_2,fe_t, fe_p,t_t:real;
m_d:integer;
begin
m_d:=0;
fe_1:=0;
fe_2:=0;
koe:=0;
t_t:=0;
t_p:=strtofloat(edit5.Text);
fe_p:=strtofloat(edit4.Text);
o_r:=strtofloat(edit7.Text);
if RadioGroup1.ItemIndex=0 then
begin
m_d:=1; // смд
fe_1:=0.0593*t_p+10.716;
koe:=fe_1/fe_p;
if koe<1 then ShowMessage('Внимание! Со-
держание железа в масле превышает допу-
стимую норму. ');
t_t:=(fe_p-10.716)/0.0593;
showmessage(concat('Остаточный ресурс ',
floattostr(o_r-t_t)));

```

```

//if ((o_r-t_p)>(o_r-t_t)) then ShowMessage
('Остаточный ресурс'Содержание железа в мас-
ле превышает допустимую норму. ');
end
else
begin
m_d:=2; // ямз
fe_2:=0.0686*t_p+2.8934;
koe:=fe_2/fe_p;
if koe<1 then ShowMessage('Внимание! Со-
держание железа в масле превышает допу-
стимую норму. ');
t_t:=(fe_p-2.8934)/0.0686;
showmessage(concat('Остаточный ресурс',
floattostr(o_r-t_t)));
end;
//ShowMessage(floattostr(fe_2));
//ShowMessage(floattostr(t_t));
end;
end.

```

Разработанный программный продукт в виде экранных форм приведен на рисунках 3-5.

Рис. 3. Экранная форма перед вводом данных [11]

The screenshot shows a Windows-style application window titled 'Form1'. It contains the following elements:

- A label 'Выберите марку двигателя' (Select engine brand).
- A group box labeled 'марка двигателя' (engine brand) containing two radio buttons: 'СМД-62' (unselected) and 'ЯМЗ-238' (selected).
- A label 'Показания счетчика мото-часов' (Motor hour meter readings) above a text box containing '1000'.
- A label 'Показания датчика содержания железа в масле' (Iron content sensor readings in oil) above a text box containing '4,76'.
- A label 'Введите ограничивающий ресурс по мото-часам' (Enter limiting resource by motor hours) above a text box containing '5000'.
- A 'Вычислить' (Calculate) button at the bottom.

Рис. 4. Экранная форма перед расчетом [11]

This screenshot shows the same 'Form1' window as in Figure 4, but with a modal dialog box open over it. The dialog box has a title bar with a close button and contains the following text:

- Label: 'Остаточный ресурс' (Remaining resource).
- Value: '4972,79008746356'.
- An 'OK' button at the bottom.

The background form is partially obscured by the dialog box.

Рис. 5. Экранная форма результата расчета [11]



### Выводы

1. Разработанный метод прогнозирования остаточного ресурса ДВС на основе анализа содержания железа в моторном масле доказал свою эффективность. Он позволяет точно оценивать износ двигателя в реальном времени и своевременно принимать решения о техническом обслуживании.

2. Использование линейных зависимостей для расчета потенциальной массы железа ( $Fe_n$ ) и сравнение ее с фактическими данными ( $Fe_{ф}$ ) обеспечивает простоту и надежность диагностики. Программная реализация метода делает его доступным для применения в различных условиях эксплуатации.

3. Предложенный программный продукт обладает высокой адаптивностью к разным маркам двигателей (например, ЯМЗ, СМД) и может быть масштабирован для использования в других отраслях, где применяется техника с ДВС.

4. Метод не только определяет текущее состояние двигателя, но и позволяет прогнозировать остаточный ресурс при изменении условий эксплуатации, что способствует оптимизации затрат на ремонт и продлению срока службы оборудования.

5. Дальнейшее развитие исследования может быть направлено на интеграцию более сложных математических моделей (например, с использованием машинного обучения) для повышения точности прогнозирования и учета дополнительных факторов износа.

### Практическая значимость

Результаты работы могут быть использованы в сельском хозяйстве, транспортной отрасли и других сферах для повышения надежности и экономической эффективности эксплуатации ДВС.

### Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность разработанного метода прогнозирования остаточного ресурса двигателей внутреннего сгорания на основе анализа содержания железа в моторном масле. Применение

данного подхода позволяет не только точно оценивать текущее техническое состояние двигателя, но и прогнозировать его дальнейшую работоспособность с учетом реальных условий эксплуатации.

Ключевым преимуществом предложенного решения является его практическая ориентированность. Использование линейных зависимостей для расчета износа в сочетании с автоматизированной обработкой данных обеспечивает простоту внедрения метода в производственные процессы. Разработанный программный продукт демонстрирует высокую адаптивность к различным маркам двигателей, что существенно расширяет область его потенциального применения.

Особую ценность представляет возможность не только диагностировать текущее состояние агрегатов, но и моделировать изменение их ресурса при корректировке режимов эксплуатации. Это открывает перспективы для оптимизации технического обслуживания и планирования ремонтов, что в конечном итоге способствует снижению эксплуатационных затрат.

Полученные результаты имеют значительный потенциал для внедрения в агропромышленном комплексе и других отраслях, где используется техника с ДВС. Дальнейшее развитие исследования может быть связано с интеграцией более сложных аналитических алгоритмов и расширением базы диагностируемых параметров, что позволит повысить точность прогнозирования и адаптивность системы к различным условиям работы.

Практическая реализация данного подхода способствует решению важной задачи повышения надежности и экономической эффективности эксплуатации двигательной техники, что соответствует современным требованиям к ресурсосбережению и экологической безопасности.

### Библиографический список

1. Баженов, Ю. В. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов автомобилей в условиях эксплуатации / Ю. В. Ба-

женов, М. Ю. Баженов. – Текст: электронный // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 4. – С. 16-21. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37116> (дата обращения: 04.07.2025).

2. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – Москва: Машиностроение, 1984. – 312 с. – Текст: непосредственный.

3. К вопросу определения фактической наработки двигателей внутреннего сгорания / С. В. Мальчиков, М. А. Сватков, И. М. Колесников, И. М. Блянкинштейн. – Текст: непосредственный // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2018. – № 2. – С. 84-89. – EDN XTUQAP.

4. Xing, L., Distefano, S. (2022). Reliability and Performance of Cyber-Physical Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 225. 108642. DOI: 10.1016/j.res.2022.108642.

5. Liu S, Jiang H. (2023). Engine remaining useful life prediction model based on R-Vine copula with multi-sensor data. *Heliyon*. 9(6): e17118. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17118.

6. Zhou, Z., Long, Z., Wang, R., et al. (2024). An aircraft engine remaining useful life prediction method based on predictive vector angle minimization and feature fusion gate improved transformer model. *Journal of Manufacturing Systems*. 76. 567-584. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.08.025.

7. Liu, J., Yu, Z., Zuo, H., et al. (2022). Multi-stage Residual Life Prediction of Aero-engine Based on Real-time Clustering and Combined Prediction Model. *Reliability Engineering & System Safety*. 225. 108624. DOI: 10.1016/j.res.2022.108624.

8. Жосан, А. А. Обеспечение ресурса двигателей тракторов агропромышленного комплекса путем контроля условий эксплуатации по химмотологическому параметру моторного масла: монография / А. А. Жосан, С. И. Головин. – Орел: Орловский государственный аграрный университет, 2013. – 189 с. – EDN VMYZON. – Текст: непосредственный.

9. Головин, С. И. Прогнозирование технического состояния двигателей транспортных

средств с использованием диагностических информаторов / С. И. Головин, М. М. Ревякин, А. А. Жосан. – Текст: непосредственный // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ – 2020): сборник материалов XII Международной научно-технической конференции, посвященной 25-летию кафедры технологии материалов и транспорта, Курск, 23 октября 2020 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 79-83. – EDN CDNNOE.

10. Дорофеев, Д. И. Ресурсосбережение через реализацию назначенного ресурса двигателя / Д. И. Дорофеев, С. И. Головин, Р. А. Булавинцев. – Текст: непосредственный // Профессия инженер: сборник материалов XI Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Орел, 14 апреля 2023 года / под общей редакцией А. Л. Севостьянова. – Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2023. – С. 381-387. – EDN FCIUVY.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665825 Российская Федерация. Прогнозирование остаточного ресурса двигателя внутреннего сгорания: № 2024664423: заявл. 25.06.2024: опубли. 05.07.2024 / А. Л. Севостьянов, С. И. Головин, С. П. Строев, Р. А. Булавинцев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина». – EDN OEQXYP.

## References

1. Bazhenov Iu.V., Bazhenov M.Iu. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa konstruktivnykh elementov avtomobilei v usloviakh ekspluatatsii // Fundamentalnye issledovaniia. 2015. No. 4. S. 16-21; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37116>.

2. Bolotin V.V. Prognozirovaniye resursa mashin i konstruksii. Moskva: Mashinostroenie, 1984. 312 s.

3. K voprosu opredeleniia fakticheskoi narabotki dvigatelei vnutrennego sgoraniia / S. V. Malchikov, M. A. Svatkov, I. M. Kolesnikov, I. M. Bliankinshtein // *Intellekt. Innovatsii. Investitsii.* – 2018. – No. 2. – S. 84-89.

4. Xing, L., Distefano, S. (2022). Reliability and Performance of Cyber-Physical Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 225. 108642. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108642.

5. Liu S, Jiang H. (2023). Engine remaining useful life prediction model based on R-Vine copula with multi-sensor data. *Heliyon*. 9(6): e17118. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17118.

6. Zhou, Z., Long, Z., Wang, R., et al. (2024). An aircraft engine remaining useful life prediction method based on predictive vector angle minimization and feature fusion gate improved transformer model. *Journal of Manufacturing Systems*. 76. 567-584. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.08.025.

7. Liu, J., Yu, Z., Zuo, H., et al. (2022). Multi-stage Residual Life Prediction of Aero-engine Based on Real-time Clustering and Combined Prediction Model. *Reliability Engineering & System Safety*. 225. 108624. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108624.

8. Zhosan, A. A. Obespechenie resursa dvigatelei traktorov agropromyshlennogo kompleksa putem kontrolya uslovii ekspluatatsii po khimmotologicheskomu parametru motornogo masla: monografiia / A. A. Zhosan, S. I. Golovin. – Orel: Orlovskii GAU, 2013. – 189 s.

9. Golovin, S. I. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoiianiia dvigatelei transportnykh sredstv s ispolzovaniem diagnosticheskikh informatorov / S. I. Golovin, M. M. Reviakin, A. A. Zhosan // *Sovremennye avtomobilnye materialy i tekhnologii (SAMIT – 2020): sbornik statei XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 25-letiiu kafedry tekhnologii materialov i transporta, Kursk, 23 oktiabria 2020 goda.* – Kursk: IuZGU, 2020. – S. 79-83.

10. Dorofeev, D. I. Resursosberezhenie cherez realizatsiiu naznachennogo resursa dvigatel'ia / D. I. Dorofeev, S. I. Golovin, R. A. Bulavintsev // *Professii inzhener: Sbornik statei po materialam XI Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Orel, 14 apreliia 2023 goda / pod obshchei redaktsiei A.L. Sevostianova.* – Orel: Orlovskii GAU, 2023. – S. 381-387.

11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM No. 2024665825 Rossiiskaia Federatsiia. Prognozirovanie ostatochnogo resursa dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia: No. 2024664423: zaiavl. 25.06.2024: opubl. 05.07.2024 / A. L. Sevostianov, S. I. Golovin, S. P. Stroeve, R. A. Bulavintsev; zaiavitel' Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia «Orlovskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet im. N.V. Parakhina».



УДК 636.085.68:631.363

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-251-9-95-104

П.А. Патрин, Д.С. Рудаков

P.A. Patrin, D.S. Rudakov

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ

## RESEARCH FINDINGS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MULTICOMPONENT GRAIN MIXTURES OF DIFFERENT MOISTURE CONTENT

**Ключевые слова:** комбикорм, многокомпонентный, зерновая смесь, влажное зерно, злаковые культуры, бобовые культуры, физико-механические свойства, скважность зерна, плани-

рование, симплекс – решетчатый план, математические модели, поверхность отклика, объемная масса, угол естественного откоса, коэффициент трения.