

Тип статьи: научная

УДК 621.89

DOI: 10.35887/2305-2538-2024-3-148-160

ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МОТОРНОГО МАСЛА ИЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЕГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Аркадий Васильевич Химченко¹, Владимир Иванович Оробинский²,
Валерий Васильевич Остриков³, Евгений Александрович Григорьев⁴,
Дмитрий Витальевич Юшко⁵

^{1, 2, 4, 5} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
г. Воронеж, Российская Федерация

³ Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и
нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация

¹himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>

³viitinlab8@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2927-768X>

⁴zhenya.grigorev.99@inbox.ru

⁵yushko_dmitr@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Евгений Александрович Григорьев,
zhenya.grigorev.99@inbox.ru

Corresponding author: Evgeniy Grigorev, zhenya.grigorev.99@inbox.ru

Реферат. В применяемой в настоящее время системе технического обслуживания транспортных средств и средств механизации сельского хозяйства существуют недостатки, связанные с периодичностью замены моторного масла. Фактическое состояние моторного масла может отличаться от желаемого при осуществлении замены. Целью данного исследования было определение перспектив создания цифрового двойника для прогнозирования остаточного ресурса моторного масла. В работе проанализированы методы контроля текущего состояния моторного масла. Надежного метода непрерывного контроля на данный момент не найдено. Показано, что основными факторами, которые следует учитывать при прогнозировании ресурса моторного масла являются нагрузочный и скоростной режимы работы двигателя. Основными параметрами, характеризующими возможность эксплуатации моторного масла, являются щелочное число и кинематическая вязкость. По известным данным были подобраны статистически обоснованные математические модели, отражающие процесс «старения» моторного масла. Моделирование изменения кинематической вязкости показывает достаточно высокую вероятность ошибки и не отражает однозначной закономерности. Установлено, что изменение щелочного числа моторного масла может происходить по экспоненциальным законам. Подобранные модели изменения щелочного числа достаточно точно описывают экспериментальные данные. Коэффициент детерминации находился в пределах 0,965 до 0,999. Проведенные исследования говорят о возможности использования цифрового двойника для прогнозирования остаточного ресурса масла. Но данные, найденные в открытых источниках, дают принципиальное понимание закономерностей, но достаточно разрозненны: относятся к разным автомобилям, тракторам и типам моторных масел. Поэтому для создания цифрового двойника необходимы комплексные экспериментальные исследования, позволяющие оценить деградацию моторного масла на разных скоростных и нагрузочных режимах.

Ключевые слова: моторное масло, двигатель внутреннего сгорания, техническое обслуживание, ресурс масла, факторы, цифровой двойник.

PREREQUISITES FOR USING A DIGITAL TWIN TO DETERMINE THE LIMITING STATE OF ENGINE OIL OR PREDICT ITS REMAINING LIFE

*Arkady Khimchenko*¹, *Vladimir Orobinsky*², *Valery Ostrikov*³, *Evgenii Grigorev*⁴,
*Dmitry Yushko*⁵

^{1, 2, 4, 5} *Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*

³ *All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture,
Tambov, Russia*

¹himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>

³viitinlab8@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2927-768X>

⁴zhenya.grigorev.99@inbox.ru

⁵yushko_dmitr@mail.ru

Abstract. Disadvantages associated with the frequency of engine oil changes exist in the currently used maintenance system for vehicles and agricultural mechanization. The actual condition of the engine oil may differ from the desired condition when changing. The purpose of this study was to determine the prospects for creating a digital twin for predicting the remaining life of motor oil. Methods for monitoring the current state of engine oil are analyzed in the work. A reliable method of continuous monitoring has not yet been found. It is shown that the main factors that should be taken into account when predicting the service life of motor oil are the load and speed conditions of the engine. The main parameters characterizing the serviceability of motor oil are base number and kinematic viscosity. Statistically based mathematical models reflecting the “aging” process of motor oil were selected based on known data. Modeling of changes in kinematic viscosity shows a fairly high probability of error and does not reflect an unambiguous pattern. It has been established that changes in the alkaline number of motor oil can occur according to exponential laws. The selected models of changes in the base number describe the experimental data quite accurately. The coefficient of determination ranged from 0.965 to 0.999. The conducted studies indicate the possibility of using a digital twin to predict the remaining oil life. But the data found in open sources provides a fundamental understanding of the patterns, but is quite fragmented: they relate to different cars, tractors and types of motor oils. Therefore, to create a digital twin, comprehensive experimental studies are required to assess the degradation of motor oil at different speed and load conditions.

Keywords: model-based design, simulation, contact interaction, model identification, identification error.

Для цитирования: Химченко А.В., Оробинский В.И., Остриков В.В., Григорьев Е.А., Юшко Д.В. Предпосылки применения цифрового двойника для определения предельного состояния моторного масла или прогнозирования его остаточного ресурса // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 69, № 3. С. 148-160. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-148-160>.

For citation: Khimchenko A., Orobinsky V., Ostrikov V., Grigorev E., Yushko D. Prerequisites for using a digital twin to determine the limiting state of engine oil or predict its remaining life. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 69(3): 148-160. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-148-160>.

Введение. На долговечность двигателя внутреннего сгорания (ДВС) существенное влияние оказывает качество моторного масла в системе смазки. При идеальной организации эксплуатации двигателя моторное масло до замены должно иметь характеристики в допустимых пределах, а его замена производится в момент достижения критического уровня показателей. Желательно всех одновременно. На деле моторное масло меняется в соответствии с заявленной изготовителем периодичностью.

На данный момент распространенными способами отслеживания периодичности замены моторного масла в двигателях внутреннего сгорания является замена в зависимости от пробега транспортного средства или от наработки моточасов работы двигателя. Очевидно, что моторное масло при отличных от предполагаемых заводом изготовителем характеристиках и свойствах или иных режимах эксплуатации двигателя будет недоиспользовать свой ресурс или иметь на момент

замены параметры ниже критически допустимых. Это особо характерно для транспортных средств с нормированием замены по пробегу.

В случае если учет наработки двигателей идет с помощью счетчика моточасов, что характерно для тракторов и сельскохозяйственных машин, то один моточас будет равняться одному астрономическому часу при номинальной частоте вращения коленчатого вала. Но трактор может эксплуатироваться при различных нагрузках, а в зависимости от операций и при разной частоте вращения коленчатого вала двигателя. При этом моточасы работы могут не отражать действительного изменения ресурса масла. Так как основные параметры работы двигателя — это нагрузка и частота вращения коленчатого вала ДВС, возможно целесообразно вести фактический учет наработки моточасов до замены или корректировку периодичности замены масла с учетом режимов эксплуатации. Такую возможность могут дать электронные устройства, работающие в режиме цифрового двойника двигателя в части периодичности обслуживания. Однако, для этого должны быть выполнены определенные условия: существенное влияние базовых факторов, отражающих режим работы двигателя, на ресурс моторного масла; понятен и прогнозируем характер зависимости снижения ресурса масла при изменении режима работы; наличие данных для создания надежных математических моделей и прогнозирования срока эксплуатации масел.

Поэтому целью данного исследования было определение перспектив создания цифрового двойника для прогнозирования остаточного ресурса моторного масла и постановка задач для дальнейших исследований в этом направлении.

Материалы и методы. В работе использовались общий анализ, факторный, регрессионный и дисперсионный анализ, статистические методы оценок значимости коэффициентов уравнений регрессии.

Применяемые методы контроля состояния моторного масла. Для определения момента выработки маслом своего ресурса применяются показатели предельного состояния масел (таблица 1).

Таблица 1 — Показатели предельного состояния моторных масел [1, 6, 11]

Показатель	Значения показателей масла		
	для бензиновых двигателей	для дизельных двигателей	
		тракторов и комбайнов	автомобилей
Изменение вязкости, %, не более:			
увеличение	25	30...35	35-40
уменьшение	20	20	30
Содержание механических загрязнений, %, не более	1	1...3	3
Щелочное число, мг КОН/г, не менее	0,5...2,0*	1,5...2,5*	1,2...2,5*
Содержание воды, %, не более	0,5	0,3	0,3
Диспергирующе-стабилизирующие свойства, баллы, не более		5	5

* — для масел, используемых в высокофорсированных двигателях, принимаются большие значения

При достижении хотя бы одним показателем состояния моторного масла табличного браковочного значения, оно может считаться израсходовавшим свой ресурс.

Учитывая результаты исследований, согласно которым при замене моторного масла на определенном автомобиле по наработке моточасов, масло имело различное фактическое состояние, ряд авторов предлагает проведение замены моторного масла по фактическим значениям показателей. Для этого важны средства их контроля.

Существует возможность применения средств экспресс контроля и электронных датчиков для отслеживания фактического состояния масла. В реальных условиях эксплуатации транспортных средств проблематично точно определить закономерности процесса деградации моторного масла. Однако, у всех работающих масел прослеживаются изменения следующих

свойств: вязкости, щелочного числа, загрязненности и температуры вспышки. Это, в том числе, и результат срабатывания присадок. Применяя лабораторные методы и средства, можно получить и проанализировать информацию об изменении перечисленных параметров.

Интерес представляют экспресс-методы контроля качества масла [7]. Например, экспресс-метод [9], основывается на анализе капельной пробы масла, вводимой в специально подготовленную смесь. Основной его задачей является упрощение и повышение точности определения щелочного числа по цвету специально подготовленного индикаторного раствора. Заявленный способ минимизирует и устраняет недостатки схожих методик. Однако не позволяет вести контроль непрерывно.

Помимо определения щелочного числа, к общей методике контроля качества масла также относят определение таких показателей как: загрязненность, кинематическая вязкость, наличие воды, температура вспышки, диспергирующе-стабилизирующие свойства. Стоит помнить, что экспресс-методы хоть и удобны в плане использования в реальных условиях, но имеют меньшую точность и предоставляют меньший спектр информации по сравнению с лабораторными методами. Кроме того, они не относятся к методам непрерывного контроля и мониторинга.

Для непрерывного мониторинга могут быть применены электронные устройства. В процессе исследования электронных датчиков, предназначенных для контроля уровня деградации масла [3], проводились испытания на тракторе МТЗ-80. При этом, использовался трибодатчик ANALEXrs Tgibo. Датчик реагировал на изменения щелочного числа, кинематической вязкости, нагара и количества воды.

По результатам испытаний и сравнения данных датчика и результатов лабораторного анализа авторами подчеркивается неточность в работе электронного устройства и рекомендуется перед началом работы проводить калибровку и настройку. Это существенно усложняет его эксплуатацию.

Известно также устройство для оценки загрязненности механическими примесями моторного масла двигателя внутреннего сгорания, описанное в [10]. По утверждению авторов оно позволяет определять остаточный ресурс масла и причины загрязнения. Для этого в устройстве предусмотрена специальная емкость для исследования технической жидкости с помощью ультразвука. Устройство работает независимо и не устанавливается на автомобиль. Проба масла берется непосредственно из картера двигателя и разделяется на две части для проведения дальнейших исследований. Устройство может быть использовано в нефтяной, автомобильной, сельскохозяйственной и других отраслях промышленности, и является альтернативой лабораторным химическим методам.

Согласно данным [12] эксплуатационным показателем, характеризующим процесс старения масла, является термоокислительная стабильность, определяемая соответствующим методом. Метод основывается на определении оптической плотности и испаряемости. Применяется прибор для термостатирования моторных масел, фотометрическое устройство и весы. По результатам ряда испытаний авторами была установлена линейная зависимость десятичного логарифма времени термостатирования при окислении и испарении моторного масла от температуры. Для прогнозирования значений термоокислительной стабильности применялась следующая модель:

$$\frac{\lg t_1 - \lg t_2}{T_2 - T_1} = \frac{\lg t_1 - \lg t_x}{T_x - T_1}, \quad (1)$$

где t_1 — время достижения установленных значений оптической прочности при температуре T_1 ;

t_2 — время достижения установленных значений оптической прочности при температуре T_2 ;

t_x — время достижения установленных значений оптической прочности при температуре T_x .

По результатам исследования было установлено, что начало процессов окисления происходит при температуре 171,8 °С. Критическая температура процессов окисления — 225 °С. Начало процессов испарения происходит при температуре 70 °С. Критическая температура процессов испарения — 218 °С. Обобщая вышеизложенное, можно утверждать, что состояние масла можно называть работоспособным до достижения им температурного значения в 218 °С.

Следует отметить, что термоокислительная стабильность фактически является обобщенным показателем, учитывающим влияние скоростного и нагрузочного режима, так как совместно с работой системы охлаждения они определяют тепловой режим двигателя.

Помимо определения остаточного ресурса по фактическому состоянию предлагаются способы определения состояния масла по влиянию внешних факторов. Исследования в этом направлении отражены во многих работах. Например, в исследовании [8], выделяются конструкционные, технические, природные и эксплуатационные факторы. К наиболее важным эксплуатационным факторам относят:

- скоростной режим двигателя;
- нагрузочный режим двигателя;
- тепловой режим двигателя.

Однако конкретного метода оценки, в данном случае не предлагается.

В целом анализ источников показывает, что подходы достаточно близки и они заключаются в попытке тем или иным методом определить показатели масла меняющиеся в процессе эксплуатации. Пока достаточно надёжных методов, которые позволяют вести непрерывный контроль состояния масла выявить не удалось. Наилучший вариант дают лабораторные методы, в том числе экспресс-методы. Как правило осуществляется оценка критериев, приведенных в таблице 1, хотя и предлагают использовать альтернативные критерии.

Основными же эксплуатационными факторами, на наш взгляд, следует считать нагрузочный и скоростной режимы работы двигателя. Тепловой режим фактически является производным и для данного конкретного двигателя с учётом его технического состояния будет зависеть от частоты вращения и нагрузки.

При этом содержание механических загрязнений и содержание воды могут изменяться в связи со случайными процессами и их моделирование маловероятно. Более простым должен быть способ контроля на основе каких-либо датчиков.

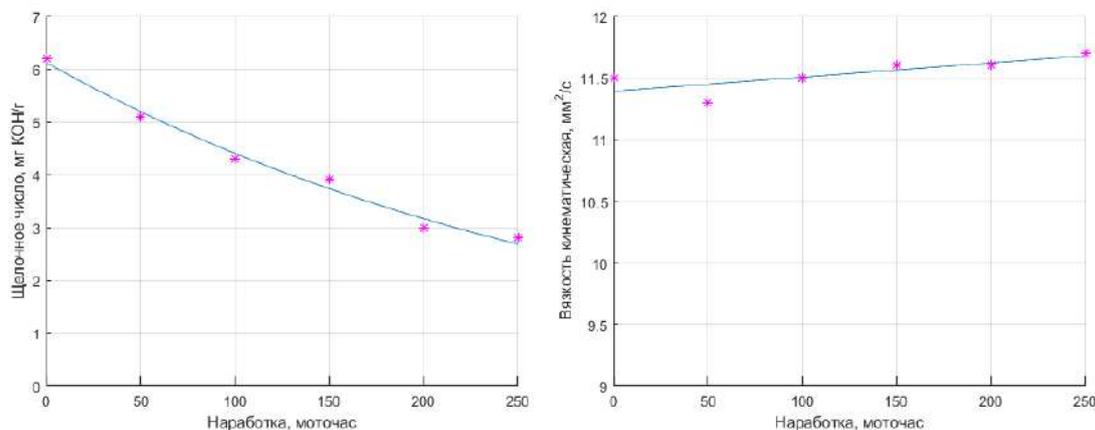
Диспергирующе-стабилизирующие свойства, сложно оценить не экспертным методом, поэтому на данном этапе они не рассматривались. Кроме того, косвенно они определяются щелочным числом.

Таким образом для оценки состояния моторного масла можно воспользоваться статистическими моделями, а, следовательно, интерес представляют экспериментальные зависимости изменения показателей моторного масла, в частности щелочного числа и вязкости в процессе эксплуатации.

Анализ характера зависимости критических показателей моторного масла от эксплуатационных факторов. Так как изменение физических свойств и химического состава моторного масла зависит от вероятности встречи определённых молекул, перемешивания масла, его диффузии и подобных процессов, деградация некоторых его показателей, как и аналогичные сходные процессы, может подчиняться экспоненциальным законам. Поэтому данные других исследователей, находящиеся в открытом доступе, были проверены на соответствие этому предположению.

Так по данным, приведенным в работе [3], были подобраны статистически обоснованные математические модели для описания изменения щелочного числа и кинематической вязкости моторного масла в процессе испытания двигателя трактора МТЗ-80. Анализ масла осуществлялся авторами работы [3] в лаборатории, что определяет достаточно высокую точность результата.

Как видно из рисунка 1 экспериментальные данные достаточно хорошо ложатся на регрессионную зависимость в виде экспоненциальной кривой.



а – изменение щелочного числа моторного масла; б – изменение вязкости моторного масла
 Рисунок 1 — Изменение щелочного числа и вязкости моторного масла в двигателе трактора МТЗ-80

Результаты поиска уравнения регрессии в среде Matlab приведены ниже:

$$CH = a_1 \cdot e^{a_2 T_H}, \quad (2)$$

где CH – щелочное число, мг КОН/г;

T_H – наработка, моточас;

a_1, a_2 – коэффициенты уравнения регрессии, приведенные в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии (2)

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента ($tStat$)	Уровень значимости ($p-value$)
a_1	6,1196	0,12526	48,855	$1,0503 \cdot 10^{-06}$
a_2	-0,003297	0,00018378	-17,94	$5,6748 \cdot 10^{-05}$

Количество наблюдений (Number of observations): 6
 Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 4
 Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,153
 Коэффициент детерминации R^2 : 0,989
 Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted) $R_{кор}^2$: 0,986
 Критерий Фишера (F -statistic vs. zero model) $F_{расч}$: $2,46 \cdot 10^{+03}$
 Уровень значимости ($p-value$): $6,62 \cdot 10^{-07}$

Таким образом, имеем модель изменения щелочного числа в виде:

$$CH = 6,1196 \cdot e^{-0,003297 T_H}, \quad (3)$$

Как видно из таблицы 2, подобранные коэффициенты уравнения регрессии имеют достаточно высокие расчётные значения критерия Стьюдента ($tStat$), что приводит к низким уровням значимости ($p-Value$) нулевой гипотезы о том, что данные коэффициенты не значимы. Фактически можно утверждать, что вероятность ошибки крайне мала и не превышает 10^{-4} .

Коэффициент детерминации R^2 даже в скорректированном виде составляет 0,986. То есть уравнение с 98,6 % вероятностью описывает изменчивость данных. Это же подтверждает и высокое значение критерия Фишера с расчётным уровнем значимости $p-value = 6,62 \cdot 10^{-07}$.

Тем не менее на графике заметно, что экспериментальные точки не идеально ложатся на кривую. Причиной может быть то, что в данном случае не учитывались режимы работы двигателя, а они в процессе наработки на отдельных временных интервалах могли отличаться.

По-другому обстоит дело с изменением кинематической вязкости. Даже линейная модель является достаточно сомнительной:

$$W = k_0 + k_1 T_H, \quad (4)$$

где W – вязкость кинематическая, мм²/с;

k_0 – свободный член уравнения;

k_1 – коэффициенты уравнения регрессии (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии (4)

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (tStat)	Уровень значимости (p-value)
k_0	11,39	0,068842	165,46	$8,0037 \cdot 10^{-09}$
k_1	0,0011429	0,00045476	2,5131	0,065838

Количество наблюдений (Number of observations): 6
 Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 4
 Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,0951
 Коэффициент детерминации R^2 : 0,612
 Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted) $R_{кор}^2$: 0,515
 Критерий Фишера (F-statistic vs. constant model) $F_{расч}$: 6,32
 Уровень значимости (p-value): 0,0658

Расчётное значение критерия Фишера для модели составляет $F = 6,32$, а уровень значимости нулевой гипотезы выше 0,05 ($p-value = 0,0658$). Такой же уровень значимости и у коэффициента уравнения регрессии, отвечающего за линейную часть. Это говорит о достаточно высокой вероятности ошибки в случае, если мы считаем, что данные варьируются не случайным образом. В любом случае здесь не наблюдается какой-то однозначной закономерности. Вероятно, моделировать и пытаться учесть с помощью цифрового двойника изменение кинематической вязкости будет достаточно сложно, за исключением случаев периодического измерения, например с помощью экспресс-методов, и уточнения уравнения регрессии методами машинного обучения при каждом измерении. Такой цифровой двойник также будет позволять прогнозировать остаточный ресурс масла по изменению кинематической вязкости.

Интересные данные были проведены в работе [8]. Испытания проводились на двух транспортных средствах одной марки с одинаковым техническим состоянием и в одинаковых климатических условиях. Обработка данных, приведенных в источнике, позволила получить зависимость:

$$CH = a_1 \cdot e^{a_2 T_H N_e} + a_3 \cdot e^{a_4 T_H N_e}, \quad (5)$$

где N_e — нагрузка, %.

Статистические параметры модели приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии (5)

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (tStat)	Уровень значимости (p-value)
a_1	1,507	0,059276	25,423	$6,8286 \cdot 10^{-20}$
a_2	-0,0001171	$1,0019 \cdot 10^{-05}$	-11,688	$7,4994 \cdot 10^{-12}$
a_3	0,29365	0,066765	4,3983	0,0001645
a_4	-0,0025057	0,0016736	-1,4972	0,1464

Количество наблюдений (Number of observations): 30
Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 26
Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,0743
Коэффициент детерминации R^2 : 0,969
Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted) $R_{кор}^2$: 0,965
Критерий Фишера (F -statistic vs. zero model) $F_{расч}$: $2,04 \cdot 10^{+03}$
Уровень значимости (p -value): $4,54 \cdot 10^{-32}$

Таким образом, имеем модель в следующем виде:

$$CH = 1,507 \cdot e^{-0,0001171T_H N_e} + 0,2937 \cdot e^{-0,0025057T_H N_e}, \quad (6)$$

Очевидно, что модель статистически может быть принята. Об этом говорят высокий коэффициент детерминации и достаточно низкие уровни значимости ошибки по критерию Фишера и по двустороннему критерию Стьюдента. Также на двумерном графике видно, как экспериментальные точки достаточно хорошо ложатся на расчетную поверхность (рисунок 2), имеющую экспоненциальный характер.

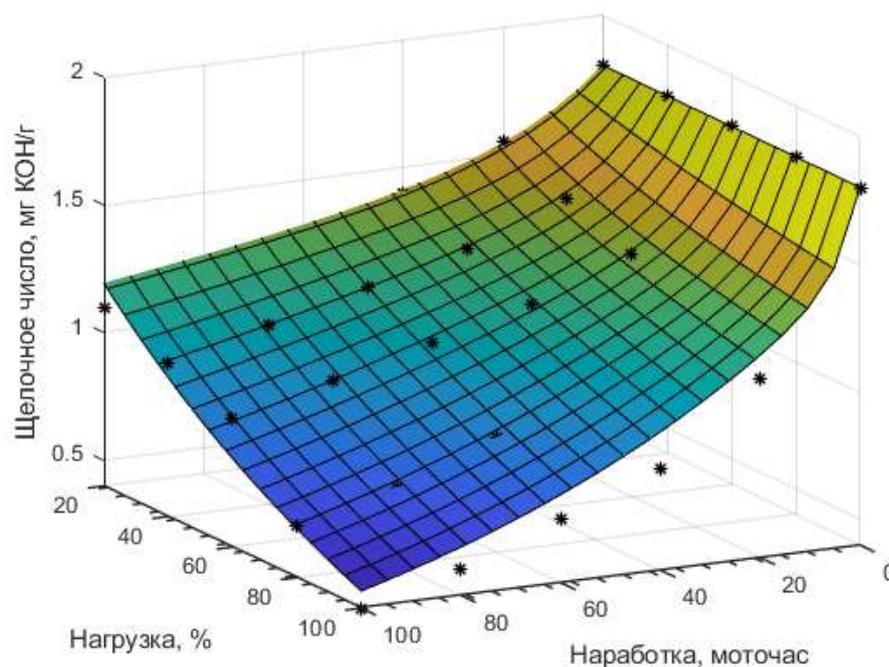


Рисунок 2 — Изменение щелочного числа моторного масла в зависимости от нагрузки двигателя по данным [8]

На данном этапе представляет интерес то, что фактически в экспоненциальной модели один из коэффициентов уравнения регрессии является линейно зависимым от нагрузки на двигатель. То есть, общая экспоненциальная зависимость деградации масла по времени эксплуатации может быть скорректирована в зависимости от режима работы двигателя.

Аналогичная ситуация наблюдается и при изменении щелочного числа при разных подачах масляного насоса (рисунок 3). Изменение подачи масляного насоса можно считать и эквивалентным изменению частоты вращения коленчатого вала, так как между этими параметрами имеется прямая конструктивная связь.

Приведенные результаты исследований подтверждают высказанный ранее тезис о экспоненциальной зависимости степени деградации моторного масла от времени эксплуатации и влиянии частоты вращения коленчатого вала и нагрузки на двигатель. Причём влияние режимных параметров в большей степени линейное. А рост нагрузки, как и рост частоты вращения коленчатого вала приводит к ускоренной деградации.

Аналогичный результат показывает и обработка данных, полученных в исследовании [4], для оценки влияния пробега грузовых автомобилей на изменение ресурса моторного масла. Обращает на себя внимание тот факт, что при одинаковых условиях эксплуатации процесс деградации моторного масла зависит от марки транспортного средства.

В работе [5] автором была проведена обработка экспериментальных данных, полученных в исследовании [13]. В результате получены зависимости изменения показателя «старения» моторного масла от различных факторов, в качестве которого принято щелочное число. При этом динамика изменения оценивалась по зависимостям относительной величины снижения ΔSN . Были получены зависимости относительной величины снижения щелочного числа от наработки в моточасах при использовании различных моторных масел и при различной жесткости работы. В основном данные аппроксимировались линейными функциями. На наш взгляд, этот подход не дает возможности практического использования и может привести к ошибкам в прогнозах. Более перспективно оценивать остаточное щелочное число.

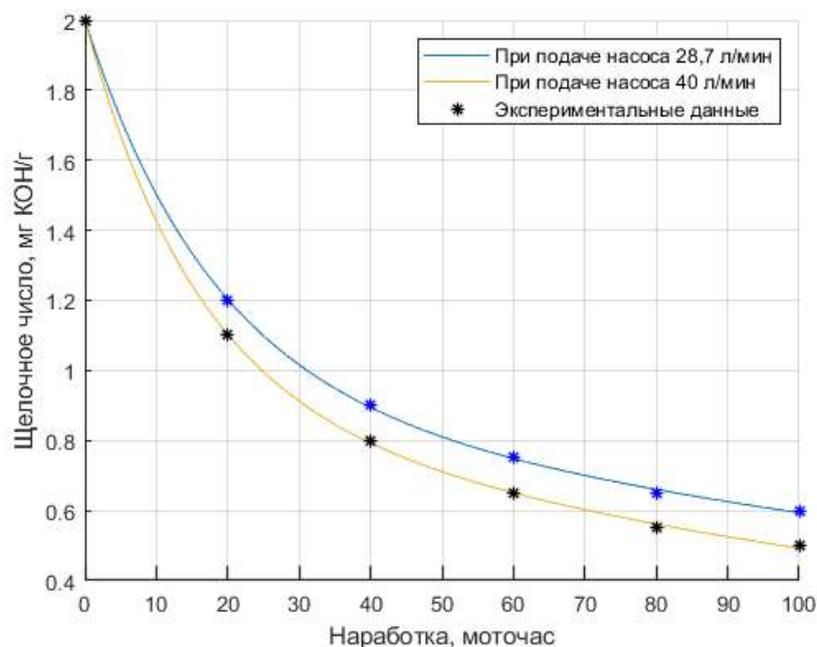


Рисунок 3 — Изменение щелочного числа моторного масла в зависимости от подачи масляного насоса по данным [8]

В таком случае также получается статистически обоснованная экспоненциальная зависимость:

$$SN\% = a_3 + a_1 \cdot e^{a_2 T_n}, \quad (7)$$

где $SN\%$ — относительная величина снижения щелочного числа, %.

При этом коэффициент детерминации $R^2 = 0,999$ (табл. 5), что существенно отличается от аналогичного $R^2 = 0,8123$ [5], а, следовательно, модель точнее описывает изменение щелочного числа. При этом уровни значимости при проверках коэффициентов регрессии модели по критерию

Стьюдента и изменчивости модели по Фишеру не превышают 0,006. Что вместе свидетельствует о качестве модели. Это же видно и на рисунке 4.

Таблица 5 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии (7)

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (tStat)	Уровень значимости (p-value)
a_1	13.071	0.36149	36.159	0.00076395
a_2	-0.01847	0.0013908	-13.28	0.0056227
a_3	86.907	0.28117	309.09	$1.0467 \cdot 10^{-05}$

Количество наблюдений (Number of observations): 5
 Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 2
 Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,265
 Коэффициент детерминации R^2 : 0,999
 Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted) $R_{кор}^2$: 0,997
 Критерий Фишера (F-statistic vs. constant model) $F_{расч}$: 789
 Уровень значимости (p-value): 0,00127

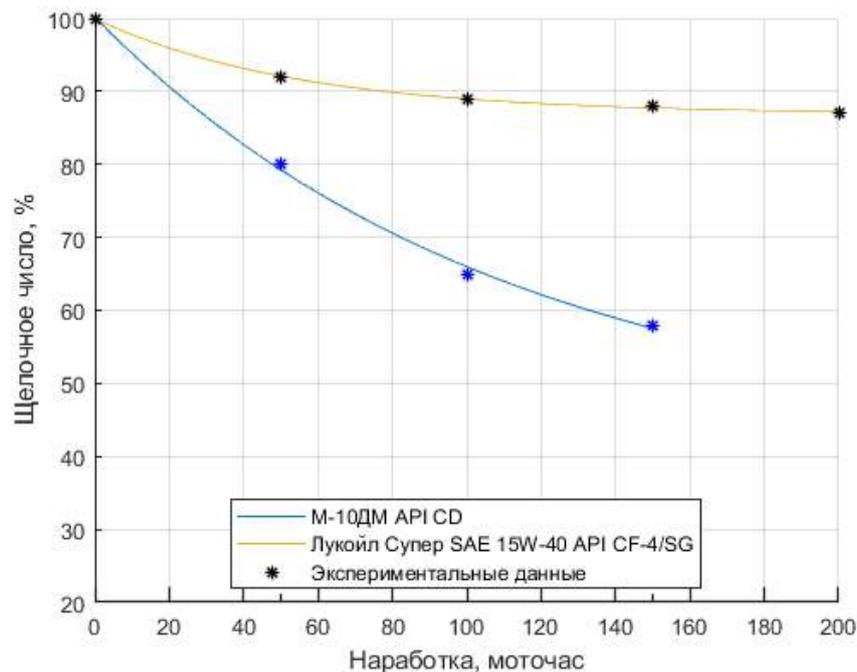


Рисунок 4 — Зависимости относительной величины снижения щелочного числа от наработки в моточасах при использовании различных моторных масел по данным [5, 13]

Встречаются и принципиально другие подходы для описания влияния различных факторов на деградацию масла. В работе [2] утверждается, что процесс старения масла сопровождается деградацией энергии и накоплением энтропии под влиянием следующих факторов:

- давление в масляной системе;
- скорость движения масла по каналам;
- температура масла в картере двигателя.

Основным разрушающим фактором, по мнению авторов, при моделировании будет являться рабочая температура масла в картере двигателя. А на основе теории энтропии была получена математическая модель для определения времени работы моторного масла в часах.

Давление в масляной системе и скорость движения масла напрямую зависит от частоты вращения масляного насоса. Как уже отмечалось выше, режим работы масляного насоса определяется частотой вращения коленчатого вала. Таким образом, все факторы, перечисленные в исследовании [2], также являются эксплуатационными. Однако, практическое использование предложенной зависимости вызывает сомнения. В первую очередь это связано с невозможностью измерения и достаточно точного определения некоторых переменных, входящих в предложенное уравнение.

Заключение. Проведенный анализ показал, что комплексным параметром, характеризующим работоспособность масла и изменяющимся в процессе эксплуатации, является его щелочное число. Основные факторы, влияющие на щелочное число — это время работы моторного масла и режим работы двигателя.

Изменения щелочного числа в зависимости от времени эксплуатации подчиняется экспоненциальным зависимостям и может быть достаточно точно смоделировано с коэффициентами детерминации от 0,965 до 0,999.

Влияние режима работы двигателя также может быть учтено в модели в качестве корректирующих зависимостей. Такой комплексный подход может позволить создать модель — цифровой двойник, который будет прогнозировать остаточный ресурс масла.

Модель должна иметь возможность корректировки или калибровки в зависимости от начального состояния моторного масла, залитого в двигатель, технического состояния и типа двигателя. Следует предусмотреть возможность корректировки работы цифрового двойника. Для этого может потребоваться промежуточный контроль состояния масла, например с помощью экспресс-лаборатории.

Изменение вязкости масла сложнее поддается моделированию, но при использовании экспресс-методов контроля данные могут быть переданы цифровому двойнику для машинного обучения и предсказания остаточного ресурса по данному параметру.

Другие контрольные параметры требуют отдельного рассмотрения и перспективным представляется их оценку осуществлять с помощью специальных датчиков или экспресс-методов.

Таким образом, имеющиеся данные говорят о возможности использования цифрового двойника для предсказания остаточного ресурса моторного масла. Это позволит более точно определять срок замены моторного масла, что экономически целесообразно с точки зрения полной выработки его ресурса, а в некоторых случаях позволит сохранить двигатель, предупредив о необходимости обслуживания. Наилучший результат может быть получен совместно с периодическим применением экспресс-методов контроля состояния моторного масла и использование результатов для корректировки работы цифрового двойника.

Данные, найденные в открытых источниках, дают принципиальное понимание закономерностей, но достаточно разрозненны: относятся к разным автомобилям, тракторам и типам моторных масел. Поэтому для создания цифрового двойника необходимы комплексные экспериментальные исследования, позволяющие оценить деградацию моторного масла на разных скоростных и нагрузочных режимах.

Список источников

1. Васильева Л.С. Автомобильные эксплуатационные материалы / Л.С. Васильева. — М.: Транспорт, 1986. — 279 с.
2. Долгова, Л. А. Расчетное определение времени работы моторного масла в двигателе внутреннего сгорания / Л. А. Долгова, В. В. Салмин // Международный технико-экономический журнал. — 2020. — № 3. — С. 47-53. — DOI 10.34286/1995-4646-2020-72-3-47-53. — EDN QEDYPL.
3. Испытания трибодатчика для контроля уровня деградации масла / А. Ю. Корнев, В. В. Остриков, В. С. Вязинкин, И. Н. Шихалев // Наука в центральной России. — 2013. — № 4. — С. 14-18. — EDN RDLKHB.

4. Лаушкин, А. В. Результаты оценки влияния эксплуатационных факторов на кинематическую вязкость моторного масла / А. В. Лаушкин // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: Сборник научных трудов по материалам 80-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 25–26 января 2022 года / Под общей редакцией А.А. Солнцева. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2022. – С. 78-82. – EDN MICVPA.
5. Назаров, Ф. Л. Факторы увеличения срока замены моторного масла в автомобильных дизельных двигателях / Ф. Л. Назаров // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 5. – С. 92-101. – DOI 10.25198/2077-7175-2023-5-92. – EDN FNCRAH.
6. ОСТ 102.25-87. Испытания сельскохозяйственной техники. Оценка эксплуатационных свойств топлива и смазочных материалов.
7. Остриков, В. В. Контроль работающих масел с помощью экспресс-методов оценки качества / В. В. Остриков, А. Ю. Корнев, И. В. Бусин // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – № 3(13). – С. 174-177. – EDN UBOAUT.
8. Оценка влияния эксплуатационных факторов на процесс старения моторного масла / Д.С. Голубев, М. Ю. Костенко, О.В. Ушаков, С. С. Штурманов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. — 2017. — № 3(35). — С. 91–97.
9. Патент № 2183018 С1 Российская Федерация, МПК G01N 31/22, G01N 21/78, G01N 33/28. Способ определения щелочного числа моторных масел : № 2001116755/04 : заявл. 15.06.2001 : опубл. 27.05.2002 / В. В. Остриков, Г. Д. Матыцин ; заявитель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт по использованию техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве. – EDN VZGDFS.
10. Патент на полезную модель № 57007 U1 Российская Федерация, МПК G01N 11/10. Устройство для оценки загрязненности механическими примесями моторного масла двигателя внутреннего сгорания : № 2005140771/22 : заявл. 26.12.2005 : опубл. 27.09.2006 / С. В. Никонов, В. М. Пашенко, Е. В. Лунин ; заявитель ФГОУ ВПО Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора П.А. Костычева. – EDN VIRSXA.
11. РД 37.001.019-84 «Методика диагностирования технического состояния автомобильных дизельных двигателей по показателям работающего масла», М., 1984
12. Рябинин, А. А. Метод прогнозирования показателей термоокислительной стабильности синтетического моторного масла K1XX G1 5W-40 SN/CF / А. А. Рябинин, Н. В. Гейль, К. А. Большаков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 1(155). – С. 52-61. – DOI 10.26730/1999-4125-2023-1-52-61. – EDN VOVVVO.
13. Динамика свойств моторного масла в эксплуатации как основа обоснования периодичности его замены для двигателей КАМАЗ нового поколения / А.Т. Кулаков [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2022. — № 6. — С. 31–37. —<https://doi.org/10.36535/0236-1914-2022-06-5>. — EDN: NEVXSU.

References

1. Vasilyeva L.S. Automotive operational materials / L.S. Vasilyeva. — М.: Transport, 1986. — 279 p.
2. Dolgova, L. A. Calculated determination of the operating time of engine oil in an internal combustion engine / L. A. Dolgova, V. V. Salmin // International Technical and Economic Journal. – 2020. – No. 3. – pp. 47-53. – DOI 10.34286/1995-4646-2020-72-3-47-53. – EDN QEDYPL.
3. Tests of a tribosensor for controlling the level of oil degradation / A. Y. Kornev, V. V. Ostrikov, V. S. Vyazinkin, I. N. Shikhalev // Science in Central Russia. – 2013. – No. 4. – pp. 14-18. – EDN RDLKHB.
4. Laushkin, A.V. The results of assessing the influence of operational factors on the kinematic viscosity of engine oil / A.V. Laushkin // Actual issues of technical operation and car service of rolling stock of motor transport: A collection of scientific papers based on the materials of the 80th scientific-methodological and research conference MADI, Moscow, January 25-26, 2022 / Under the general

editorship of A.A. Solntsev. – Moscow: Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), 2022. – pp. 78-82. – EDN MICVPA.

5. Nazarov, F. L. Factors of increasing the period of engine oil replacement in automotive diesel engines / F. L. Nazarov // Intelligence. Innovation. Investment. - 2023. – No. 5. – pp. 92-101. – DOI 10.25198/2077-7175-2023-5-92. – EDN FNCRAH.

6. OST 102.25-87. Testing of agricultural machinery. Assessment of the operational properties of fuels and lubricants.

7. Ostrikov, V. V. Control of working oils using express methods of quality assessment / V. V. Ostrikov, A. Yu. Kornev, I. V. Busin // Innovations in agriculture. – 2015. – № 3(13). – Pp. 174-177. – EDN UBOAUT.

8. Assessment of the influence of operational factors on the aging process of engine oil / D.S. Golubev, M. Yu. Kostenko, O.V. Ushakov, S. S. Shturmanov // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. — 2017. — № 3(35). — Pp. 91-97.

9. Patent No. 2183018 C1 Russian Federation, IPC G01N 31/22, G01N 21/78, G01N 33/28. Method for determining the alkaline number of motor oils: No. 2001116755/04: application 15.06.2001: publ. 27.05.2002 / V. V. Ostrikov, G. D. Matytsin; applicant State Scientific Institution All-Russian Research and Design Institute for the Use of machinery and petroleum products in agriculture. – EDN VZGDFS.

10. Utility model patent No. 57007 U1 Russian Federation, IPC G01N 11/10. device for assessing contamination with mechanical impurities of engine oil of an internal combustion engine: No. 2005140771/22: application. 12/26/2005: publ. 09/27/2006 / S. V. Nikonov, V. M. Pashchenko, E. V. Lunin ; applicant FGOU VPO Ryazan State Agricultural Academy named after Professor P.A. Kostychev. – EDN VIRSXA.

11. RD 37.001.019-84 "Methodology for diagnosing the technical condition of automobile diesel engines according to the indicators of working oil", М., 1984

12. Ryabinin, A. A. Method of forecasting indicators of thermal oxidative stability of synthetic K1XX G1 5W-40 SN/CF engine oil / A. A. Ryabinin, N. V. Geil, K. A. Bolshakov // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2023. – № 1(155). – Pp. 52-61. – DOI 10.26730/1999-4125-2023-1-52-61. – EDN VOVVVO.

13. Dynamics of the properties of engine oil in operation as the basis for substantiating the frequency of its replacement for KAMAZ engines of a new generation / A.T. Kulakov [et al.] // Transport: science, technology, management. Scientific information collection. — 2022. – No. 6. – pp. 31-37. – <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2022-06-5>. — EDN: NEVXSU.

Информация об авторах

А.В. Химченко – кандидат технических наук, доцент; В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; В.В. Остриков – доктор технических наук, профессор; Е.А. Григорьев – аспирант; Д.В. Юшко – студент.

Information about the authors

A. Himchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; V. Orobinsky – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor; V. Ostrikov – Doctor of Technical Sciences; E. Grigorev – graduate student; D. Yushko – student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 16.05.2024 Принята к публикации (Accepted): 25.06.2024