

Тип статьи: научная  
УДК 621.43;519.242  
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-5-94-104

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ЩЕЛОЧНОГО ЧИСЛА МОТОРНОГО МАСЛА ОТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ В ПРЕДЕЛАХ ОДНОГО СРОКА ЗАМЕНЫ

*Аркадий Васильевич Химченко*<sup>1</sup>, *Владимир Иванович Оробинский*<sup>2</sup>,  
*Валерий Васильевич Остриков*<sup>3</sup>, *Евгений Александрович Григорьев*<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 4</sup> Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,  
г. Воронеж, Российская Федерация

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

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

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

<sup>4</sup>zhenya.grigorev.99@inbox.ru

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

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

**Реферат.** Своевременность замены масла в двигателях современной сельскохозяйственной техники экономически целесообразна, так как позволяет полностью выработать ресурс моторного масла и обеспечить сохранность двигателя внутреннего сгорания. Одним из способов достаточно точно определить момент замены моторного масла является применение цифрового двойника, для создания которого необходимы данные по влиянию эксплуатационных факторов на деградацию масла, полученные экспериментальным путем. Особенности проведения экспериментальных исследований при стендовых испытаниях двигателя проанализированы в работе. Разработан алгоритм планирования эксперимента на основе вероятностных методов. Показано, что стендовый эксперимент по сбору данных для построения цифрового двойника может быть проведён в пределах одного срока замены моторного масла, он должен планироваться в несколько этапов и состоять из нескольких серий опытов, так как заранее неизвестен момент достижения критического значения щелочного числа, и при планировании основного эксперимента, покрывающего 250 моточасов в две серии по 10 опытов, определена продолжительность проведения каждого опыта из условия равенства погрешности определения изменения щелочного числа. Продолжительность первой серии опытов составила 62,7 моточасов, а второй — 187,3 моточаса. Разработанный алгоритм позволил построить план стендового эксперимента, состоящего из четырёх серий опытов с последовательным равномерным заполнением факторного пространства без повторения режимов работы двигателя. Полученный план эксперимента позволяет определить данные с планируемой точностью, минимизирует количество опытов и при любой продолжительности эксперимента равномерно заполняет факторное пространство.

**Ключевые слова:** моторное масло, двигатель внутреннего сгорания, планирование эксперимента, алгоритм, факторы, цифровой двойник.

## DESIGN OF EXPERIMENT FOR DETERMINE THE DEPENDENCE OF CHANGE IN THE ALKALINE NUMBER OF MOTOR OIL ON OPERATING FACTORS WITHIN ONE REPLACEMENT PERIOD

*Arkady Khimchenko*<sup>1</sup>, *Vladimir Orobinsky*<sup>2</sup>, *Valery Ostrikov*<sup>3</sup>, *Evgenii Grigorev*<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 4</sup> Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture,  
Tambov, Russia

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

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

<sup>4</sup>zhenya.grigorev.99@inbox.ru

**Abstract.** Timely replacement of oil in engines of modern agricultural machinery is economically feasible, since it allows to fully exhaust the resource of engine oil and ensure the safety of the internal combustion engine. One of the ways to determine the moment of engine oil replacement with sufficient accuracy is to use a digital twin, for the creation of which data on the influence of operational factors on oil degradation obtained experimentally are required. Features of conducting experimental studies during engine bench tests are analyzed in the paper. An algorithm for planning an experiment based on probabilistic methods has been developed. It is shown that a bench experiment to collect data for building a digital twin can be carried out within one period of engine oil replacement, it should be planned in several stages and consist of several series of experiments, since the moment of reaching the critical value of the base number is not known in advance, and when planning the main experiment covering 250 engine hours in two series of 10 experiments, the duration of each experiment is determined from the condition of equality of the error in determining the change in the base number. The duration of the first series of experiments was 62.7 engine hours, and the second — 187.3 engine hours. The developed algorithm allowed to build a plan of a bench experiment consisting of four series of experiments with sequential uniform filling of the factor space without repeating the engine operating modes. The resulting experimental plan allows to determine the data with the planned accuracy, minimizes the number of experiments and uniformly fills the factor space at any duration of the experiment.

**Keywords:** motor oil, internal combustion engine, design of experiment, algorithm, factors, digital twin.

**Для цитирования:** Химченко А.В., Орбинский В.И., Остриков В.В., Григорьев Е.А. Планирование эксперимента для определения зависимости изменения щелочного числа моторного масла от эксплуатационных факторов в пределах одного срока замены // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 71, № 5. С. 94-104. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-5-94-104>.

**For citation:** Khimchenko A., Orobinsky V., Ostrikov V., Grigorev E. Design of experiment for determine the dependence of change in the alkaline number of motor oil on operating factors within one replacement period. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 71(5): 94-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-5-94-104>.

**Введение.** Задача сохранения долговечности и надёжности двигателя внутреннего сгорания (ДВС) всегда являлась достаточно актуальной задачей. Особенно важной она является в сельском хозяйстве, так как сельскохозяйственная техника зачастую работает на достаточном удалении от сервисных предприятий и ремонтных мастерских. Кроме того, поломка двигателя во время уборки урожая может привести к дополнительным значимым потерям. Важным элементом, влияющим на надёжность и долговечность ДВС, является работа системы смазки, в том числе качество и состояние моторного масла. С экономической точки зрения наиболее выгодно проводить замену масла в момент полной выработки ресурса.

Определить его достаточно сложно. Причина — это влияние множества факторов, в особенностях эксплуатационных, на состояние моторного масла [1, 6, 9].

Как показал анализ различных источников в целом понимание проблемы имеется и попытки её решения и делаются достаточно давно [3, 4, 5, 6, 8]. Не все решения, например, пятидесятилетней давности можно использовать сегодня, так как нефтехимическая промышленность существенно продвинулась в улучшении показателей масел, получении новых свойств. Разрабатываются и применяются новые присадки. В целом их работоспособность по-прежнему можно определить с помощью щелочного числа [1, 7, 2]. Однако характер его

изменения меняется и меняются сроки замены масел. Возможно применение экспресс методов для определения состояния моторных масел [8].

Анализ результатов исследований показывает, что данные по характеру изменения щелочного числа достаточно разрознены, относятся к разным транспортно-технологическим средствам и получены на разных режимах работы [3, 4, 5]. Это не даёт возможности получить обобщённую зависимость влияния основных эксплуатационных факторов, таких как нагрузка и частота вращения коленчатого вала на изменение количества моточасов работы до достижения момента необходимости замены масла.

Однако все экспериментальные данные объединяет возможность аппроксимации с помощью экспоненциальной зависимости [5]. Это даёт возможность обобщить результаты и получить аналитическую связь между щелочным числом моторного масла и тремя основными факторами, влияющими на него в процессе эксплуатации: количеством отработанных моточасов, нагрузкой и частотой вращения коленчатого вала. На базе данных зависимостей может быть построен цифровой двойник, прогнозирующий остаточный ресурс моторного масла.

Для получения такой зависимости необходимо проведение исследований и получение экспериментальных данных в пределах срока замены масла. Кроме того, важным требованием может являться равномерное заполнение факторного пространства [10], что позволит точнее определить влияние режима работы двигателя на изменение щелочного числа моторного масла.

Целью данного исследования было построение рационального плана стендового эксперимента для сбора данных и создания цифрового двойника для прогнозирования остаточного ресурса моторного масла.

**Материалы и методы.** В работе использовались общий анализ, элементы математического анализа, регрессионный анализ и планирование эксперимента вероятностными методами.

**Особенности стендового эксперимента при определении изменения щелочного числа моторного масла.** План эксперимента должен быть построен, исходя из ряда требований, которые вытекают из особенностей исследуемого процесса.

На этапе анализа информации было принято, что в качестве выходного параметра моторного масла будет оцениваться значение щелочного числа. Выбраны и выделены три фактора, определяемые процессом эксплуатации — это количество отработанных моточасов с момента замены масла, параметры нагрузки на двигатель, частота вращения коленчатого вала. В конечном итоге при обработке полученных данных могут быть приняты некоторые уточнения. Вместо частоты вращения коленчатого вала может быть использовано отношение частоты вращения к номинальной частоте двигателя. Параметр, определяющий нагрузку на двигатель, может быть различным. Это и положение рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД), и крутящий момент двигателя при данной частоте вращения, и расход топлива на данном режиме работы. Наиболее правильным, на наш взгляд, было бы остановиться на крутящем моменте. При стендовых испытаниях этот параметр может являться установочным, так как устанавливать положение рейки в ТНВД без разборки и удаления регулятора достаточно сложно. Мгновенный расход топлива на заданном скоростном режиме является достаточно хорошим и удобным фактором, определяющим нагрузку, но может задаваться в случае использования электронной системы впрыска и соответствующего программного обеспечения. Контролировать его можно в любой топливной системе, хотя это и имеет различные технические решения и, соответственно, стоимость. При стендовых испытаниях использовать этот фактор будет сложно.

Теория планирования инженерного эксперимента, которая зачастую используется для оптимизации эксперимента в исследовательских задачах, требует, чтобы факторы имели следующие свойства: независимость, управляемость, однозначность и совместимость.

Частота вращения коленчатого вала и нагрузка на двигатель в рамках обычно принимаемых допущений можно считать независимыми факторами. Все три ранее названные факторы являются однозначными и совместимыми. Однако с управляемостью имеется проблема. В случае с нагрузкой, её определение при стендовых испытаниях с помощью весового устройства, что фактически определяет крутящий момент двигателя, делает фактор управляемым. Частота вращения коленчатого вала также может быть установлена и является управляемым фактором. Данные факторы независимы и могут быть установлены в любой момент на любой уровень.

Время работы двигателя в моточасах в натурном эксперименте не является управляемым фактором. К сожалению, мы не можем провести отдельный эксперимент для какого-то времени работы. Необходимо чтобы двигатель отработал весь диапазон времени до достижения момента необходимости замены моторного масла, а в процессе накопления моточасов возможно изменение других факторов.

Данный факт делает неприменимыми методы классической теории инженерного эксперимента.

Наиболее простое решение задачи построение плана эксперимента — это оставить два управляемых фактора и для различных их сочетаний провести серии экспериментов с наработкой двигателем количества моточасов до достижения срока замены масла.

Даже предполагая линейный закон для влияния нагрузки и частоты вращения коленчатого вала мы получим серию из четырёх экспериментов. Учитывая, что для исследуемого двигателя завод-изготовитель в зависимости от типа и качества масла предполагает его замену при 250 и 500 моточасах работы, как минимум придётся отработать 1000 моточасов. Это требует как надёжности экспериментального двигателя, так и всего экспериментального оборудования. Кроме того, потребуется значительное количество топлива для проведения экспериментальных исследований.

Строго говоря, при последовательном проведении четырёх таких экспериментов будет сложно говорить об их воспроизводимости. В процессе эксплуатации двигатель может загрязняться и численные значения коэффициентов уравнения, описывающего характер изменения щелочного числа, определяющего наличие присадок, вероятнее всего будут меняться. В цифровом двойнике это можно корректировать с помощью процессов тарировки и калибровки, но базовый характер кривых желательнее получить с одного эксперимента в пределах одного срока замены масла.

В случае определения изменения щелочного числа моторного масла в пределах одного срока замены фактор времени работы будет меняться непрерывно. Частота вращения коленчатого вала и нагрузка на двигатель могут задаваться в соответствии с некоторым планом. То есть в таком случае фактически требуется перейти к двухфакторному плану эксперимента. При этом не удастся получить зависимость щелочного числа ни от одного из этих факторов, так как при разном отработанном времени будет свой набор режимов работы двигателя. Но возможно рассмотреть процесс, используя дифференциальный подход.

Так как фактически требуется получить зависимость

$$CH = f(\mathbf{X}), \quad CH = f(x_1, x_2, x_3), \quad (1)$$

где  $CH$  — щелочное число моторного масла,  $\mathbf{X}$  — матрица факторов  $x_1, x_2, x_3$ , возможно перейти к производной по времени

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{d(f(x_1, x_2, x_3))}{dt}, \quad (2)$$

или в конечной форме

$$\frac{\Delta CH}{\Delta t} = \frac{\Delta(f(x_1, x_2, x_3))}{\Delta t}. \quad (3)$$

В случае если значение факторов в течение промежутка времени  $\Delta t$  будет неизменным, можно говорить о том, что мы получили скорость изменения щелочного числа. В большей степени интересна скорость изменения щелочного числа не с изменением времени, а изменением отработанных моточасов. Учитывая, что количество отработанных моточасов является неуправляемым фактором, стендовый эксперимент может быть построен по следующей принципиальной методике:

– планирование эксперимента осуществляется как двухфакторного с равномерным заполнением факторного пространства для покрытия всего диапазона моточасов работы двигателя;

– отдельные опыты соответствуют участкам изменения первого фактора — количества отработанных моточасов и идут последовательно, фиксируя изменение этого фактора;

- в течение опыта 2 фактора, частота вращения коленчатого вала и нагрузка на двигатель, должны оставаться постоянными, на заранее определённом уровне;
- эксперимент должен планироваться в несколько этапов и проводится несколькими сериями опытов, так как заранее неизвестен момент достижения критического значения щелочного числа  $CH_{кр}$ , после которого эксплуатация двигателя опасна или не целесообразна.

В таком случае зависимость (2) преобразуется в

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{d(f(x_1, x_2, x_3))}{dx_1} \frac{dx_1}{dt} \Leftrightarrow dCH = dx_1 \frac{d(f(x_1, x_2, x_3))}{dx_1}, \quad (4)$$

что в конечных величинах при определении  $\Delta CH$  за время опыта  $\Delta x_1$  позволит определить скорость по моточасам как функцию, зависящую от трех факторов

$$\frac{\Delta CH}{\Delta x_1} = F(x_1, x_2, x_3). \quad (5)$$

Ее интегрирование в дальнейшем и даст искомую зависимость, позволяющую прогнозировать достижение критического значения щелочного числа.

**Методика планирования эксперимента.** Проведение эксперимента предполагается в 4 этапа, исходя из предположения, что критическое значение  $CH_{кр}$  может быть достигнуто в диапазоне 250–500 моточасов, но возможно и ранее. Каждый этап предполагает выполнение одной серии опытов.

Выполнение первых 2-х серий опытов предполагает выход на 250 моточасов работы. В случае недостижения критических значений добавляется следующий этап. Максимальное количество этапов в данном случае — 4.

Особенностью данного эксперимента является то, что один из факторов изменяется последовательно. Два других являются независимыми и планирование эксперимента осуществляется для определения установочных значений этих факторов. При этом количество моточасов работы на каждом режиме определяется отдельно и независимо от режима работы. Количество моточасов работы в одном опыте будет определяться количеством опытов в серии экспериментов на одном этапе. В случае увеличения количества опытов, погрешность при определении изменения щелочного числа  $\Delta CH$  будет возрастать. Уменьшение же количества опытов приведёт к уменьшению количества точек, что скажется на качестве аппроксимации данных при определении зависимости для цифрового двойника.

В целом определение плана эксперимента сводится к трем основным этапам: определение количества опытов в серии эксперимента, определение шага в моточасах для изменения управляемых факторов при непрерывном изменении времени работы в отдельных сериях опытов, планирование изменения независимых управляемых факторов для каждой серии опытов.

**Определение количества опытов в одной серии эксперимента.** Количество опытов в одной серии эксперимента определялось, исходя из следующих соображений:

- 1) Для удобства количество опытов в каждой серии эксперимента может быть одинаковым. Это позволит равномерно насыщать факторное пространство при переходе от серии к серии.
- 2) Из-за возможности достижения критического значения  $\Delta CH_{кр}$  до 250 моточасов работы двигателя каждый участок 0–250 и 250–500 моточасов должен быть разбит на два этапа.
- 3) Продолжительность опытов должна быть выбрана, исходя из равной точности определения  $\Delta CH$ .

Последние условие является наиболее значимым и определяющим. При проведении эксперимента использовался двигатель трактора МТЗ-80. В него заливалось масло G Profi MSI PLUS 15W-40, используемое хозяйствами агропромышленного комплекса в Воронежской области.

Минимальное значение щелочного числа для товарного масла должно быть 11,3 мг КОН/г [7]. Это значение может быть точкой отсчёта для определения возможного диапазона изменения щелочного числа. Минимальное значение, при котором прекращается проведение эксперимента с учетом требования нормативных актов, было принято 1 мг КОН/г.

Как было показано авторами в [5], изменение щелочного числа в процессе эксплуатации однозначно подчиняется экспоненциальному закону, несмотря на то что научных в статьях

присутствуют различные интерпретации и попытки аппроксимировать данные экспериментов с помощью других закономерностей [3, 4, 9]. Это позволяет описать предположительное изменение щелочного числа если известны точки начала и окончание эксперимента. Предполагаемая зависимость должна проходить через значение 11,3 мг КОН/г при  $T_H = 0$  моточасов и через значение 1 мг КОН/г при  $T_H = 250$  моточасов работы.

Такой зависимостью может быть уравнение

$$CH = a_1 e^{a_2 T_H} \quad (6)$$

для которого значение коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  определены и приведены в таблице 1, а общий вид зависимости показан на рисунке 1.

Таблица 1 - Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов уравнения регрессии (6)

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (tStat)	Уровень значимости (p-value)
$a_1$	11,3	0,00030695	36814	$1,729 \cdot 10^{-5}$
$a_2$	-0,0096992	$1,2326 \cdot 10^{-6}$	-7869	$8,090 \cdot 10^{-5}$

Коэффициент детерминации  $R^2$ : 1,0, скорректированный коэффициент детерминации  $R_{кор}^2$ : 1,0  
 Критерий Фишера (F-statistic vs. zero model)  $F_{расч}$ :  $6,83 \cdot 10^3$ , уровень значимости (p-value):  $2,71 \cdot 10^{-05}$

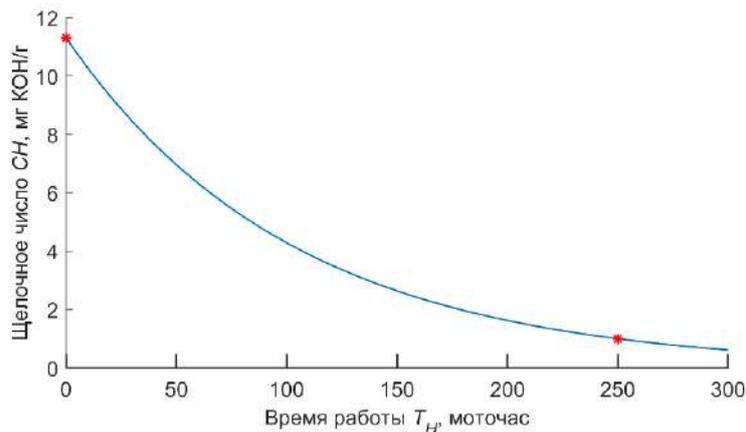


Рисунок 1 - Характер изменения щелочного числа моторного масла в зависимости от времени работы двигателя в эксперименте

Учитывая уровни значимости коэффициентов регрессии и критерия Фишера, можем сделать вывод о возможности применения данного уравнения, так как вероятность ошибки достаточно мала. Кроме того, данная зависимость используется только для прогнозирования ошибки в результатах опытов эксперимента и такая точность более чем приемлема.

Определение щелочного числа в пробах планируется осуществлять лабораторным методом. Используемые методы и оборудование позволяет получить значение  $CH$  с абсолютной погрешностью  $\delta_{CH} = 0,05$  мг КОН/г. Относительная погрешность может быть определена как

$\Delta_{CH} = \frac{\delta_{CH}}{\Delta CH} \cdot 100\%$ . Таким образом количество опытов в серии опытов при 2-х сериях на диапазон изменения  $CH$  в планируемом эксперименте

$$N_{оп.сер} = \Delta_{CH} \frac{CH_{max} - CH_{min}}{2\delta_{CH} \cdot 100\%} \quad (7)$$

Учитывая, что регрессионный анализ позволяет сглаживать погрешности эксперимента, и при этом желательно иметь максимальное количество точек для построения цифрового двойника, было принято решение остановиться в эксперименте на максимально возможной погрешности не

более 10 %. В таком случае, количество опытов в одной серии должно, согласно полученной зависимости, быть равно 10.

В случае если деградация масла будет идти быстрее и полные две серии опытов не понадобятся, то точность определение  $\Delta CH$  будет повышаться. В случае продления эксперимента — понижаться.

**Определение шага изменения управляемых факторов при непрерывном изменении времени работы в отдельных сериях опытов.** Данная задача решалась с помощью использования методов оптимизации.

Для количества опытов в серии равно  $N_{\text{оп.сер}}$  мы имеем такое же количество участков и  $k = N_{\text{оп.сер}} + 1$  точек времени работы двигателя на кривой изменения  $CH$  (рисунок 1). Тогда изменение щелочного числа  $\Delta CH$  в  $i$ -ом опыте

$$\Delta CH_i = a_1 e^{a_2 T_{H_i}} - a_1 e^{a_2 T_{H_{i+1}}} . \quad (8)$$

Задача оптимизации может быть сформулирована как равенство изменений щелочного числа  $\Delta CH$  во всех опытах:

$$\Delta CH_1 = \Delta CH_2 = \dots = \Delta CH_i = \dots = \Delta CH_{k-1} . \quad (9)$$

То есть должна быть решена система из  $N_{\text{оп.сер}}$  уравнений (8) при условии (9) и найдены значения  $T_{H_i}$ . Система может дать решение на любом участке, для любой серии опытов, так как известны коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$ . Но рассматривать серии опытов отдельно не имеет смысла, так как на каждом участке будет своё решение, а границы участков для серии опытов заранее не определены. Поэтому целесообразно решать систему для всего интервала изменения  $CH$ , для которого известны начальное и конечное значения. Для планируемого проведения базовых серий до достижения  $T_H = 250$  моточасов количество точек  $k = 2N_{\text{оп.сер}} + 1$ , а уравнение (9) примет вид

$$CH_{\text{max}} - a_1 e^{a_2 T_{H_2}} = \dots = a_1 e^{a_2 T_{H_i}} - a_1 e^{a_2 T_{H_{i+1}}} = \dots = a_1 e^{a_2 T_{H_{k-1}}} - CH_{\text{min}} . \quad (10)$$

Получаем систему из  $k - 1$  уравнений.

Решение системы численными методами оптимизации позволяет получить продолжительность работы двигателя в каждом опыте (таблица 2). Таким образом первая серия опытов, при которой снижение щелочного числа должно составить примерно половину допустимого, составляет 62,7 моточасов, а вторая — 187,3 моточаса. Вероятно такое решение может быть получено и аналитически.

Таблица 2 — Продолжительность работы двигателя в опытах 2-х серий

Серия	Количество моточасов $T_H$ в опыте №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4,8	5,1	5,3	5,6	5,9	6,2	6,7	7,2	7,6	8,3
2	9	9,9	10,9	12,3	13,9	16	19	23,3	30,2	42,8

В случае если критическое значение щелочного числа не будет достигнуто за 250 моточасов работы двигателя, коэффициенты базовой зависимости (6) могут быть уточнены и аналогичным образом рассчитаны временные промежутки работы двигателя для следующих серий экспериментов.

**Планирование изменения независимых управляемых факторов для каждой серии опытов.** Для более широкого охвата режимов работы двигателя в эксперименте планирование может быть выполнено с помощью алгоритма латинских гиперкубов. Однако особенностью является наличие серий опытов. Эта задача потребовала написание собственного алгоритма. Решение было реализовано в среде Matlab.

Суть алгоритма заключалась в следующем. Факторное пространство двух независимых факторов разбивалось на участки, характеризующие уровни факторов. Так как количество серии опытов в эксперименте планировалось не более четырёх, а в каждой серии было определено 10 опытов, количество уровней факторов  $4 \cdot 10 = 40$ . Таким образом факторное пространство разбивается на  $40^2 = 1600$  точек (рисунок 2), каждая из которых характеризует режим работы двигателя. План должен быть построен таким образом, чтобы точки были равномерно

распределены в каждой серии опытов, а по окончании 4-й серии были задействованы все уровни факторов из факторного пространства. При этом режимы не должны повторяться, как показано на гистограммах рисунок 2.

Для контроля равномерности заполнения факторного пространства оно разбивалось на области, в соответствии с количеством серий опытов и количеством факторов  $n = 4^2 = 16$ .

Первое заполнение факторного пространства выполнялось с помощью алгоритма определения уровней факторов методом латинских гиперкубов из пакета Statistic and Machine Learning Toolbox Matlab с алгоритмом оптимизации на расстоянии между точками. При достаточно большом количестве итераций алгоритм даёт хороший результат.

В дальнейшем осуществлялись проверки принадлежности точек к участкам и зонам. Задействованные участки исключались из дальнейшего планирования. Зоны, не задействованные в первой серии, получали приоритет в плане эксперимента в следующей серии опытов. Случайным образом определялись дополнительные зоны, и также на основе метода Монте-Карло определялись участки — уровни факторов для следующей серии опытов. Такая процедура может повторяться до последней серии, не зависимо от их количества, в которой остаётся всего лишь по 10 режимов для каждого фактора. Их распределение также осуществлялось на основе случайного выбора.

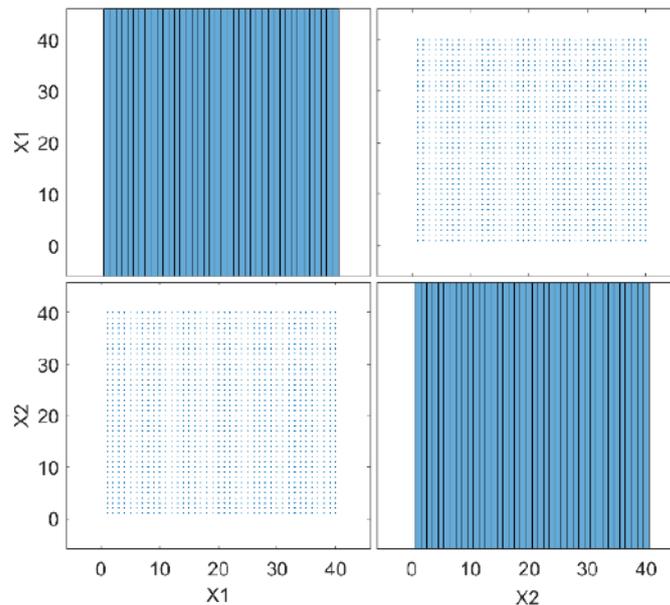


Рисунок 2 — Сетка заполнения факторного пространства

Разработанный алгоритм, на наш взгляд, дал неплохой результат (рисунок 3).

На матричной диаграмме видно, что факторное пространство, заполнено достаточно равномерно. Точки разного цвета соответствуют разным сериям опытов, и каждая из серий равномерно заполняет факторное пространство. Таким образом, каждая серия может являться самостоятельным планом эксперимента.

Гистограммы уровней факторов (рисунок 3) показывают, что уровни факторов распределены равномерно, и повторения отсутствуют.

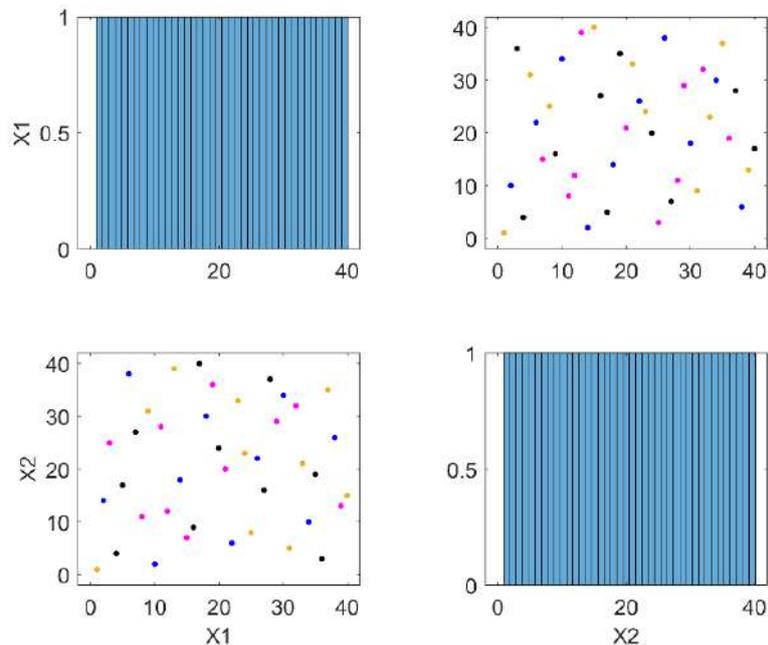


Рисунок 3 — Матричная диаграмма факторного пространства по планам 1–4 серий опытов

**Заключение.** На современном уровне развития компьютерной техники не обязательно иметь план эксперимента, обладающий определёнными свойствами для получения коэффициентов уравнения регрессии по детерминированным зависимостям. Методы машинного обучения позволяют получить коэффициенты для уравнения регрессии любого вида, однако для качественной модели предпочтительно, чтобы информация о поверхности отклика в факторном пространстве представлялась равномерно [10]. Этому способствуют планы на основе вероятностных методов, что и было реализовано в работе.

Проведенное исследование показало, что:

1. Стендовый эксперимент по сбору данных для построения цифрового двойника может быть проведён в пределах одного срока замены моторного масла.
2. Эксперимент должен планироваться в несколько этапов и состоять из нескольких серий опытов, так как заранее неизвестен момент достижения критического значения щелочного числа.
3. При планировании основного эксперимента, покрывающего 250 моточасов в две серии по 10 опытов, получены значения продолжительности проведения каждого опыта из условия равенства погрешности определения изменения щелочного числа  $\Delta SN$ , которая не превышает 10 %. При этом продолжительность первой серии опытов 62,7 моточасов, а второй — 187,3 моточаса.
4. Разработанный алгоритм позволяет построить план стендового эксперимента, состоящего из четырёх серий опытов с последовательным равномерным заполнением факторного пространства без повторения режимов работы двигателя.

Анализ результатов позволяет утверждать, что цель, поставленная в работе, достигнута. Полученный план эксперимента позволяет определить данные с известной и достаточной точностью, минимизирует количество опытов и при любой продолжительности эксперимента равномерно заполняет факторное пространство.

#### Список источников

1. Васильева Л.С. Автомобильные эксплуатационные материалы / Л.С. Васильева. — М.: Транспорт, 1986. — 279 с.

2. РД 37.001.019-84 «Методика диагностирования технического состояния автомобильных дизельных двигателей по показателям работающего масла», М., 1984
3. 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.
4. 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.
5. Предпосылки применения цифрового двойника для определения предельного состояния моторного масла или прогнозирования его остаточного ресурса / А. В. Химченко, В. И. Орбинский, В. В. Остриков [и др.] // Наука в центральной России. — 2024. — № 3(69). — С. 148-160. — DOI 10.35887/2305-2538-2024-3-148-160. — EDN DVWSLV.
6. 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.
7. ОСТ 102.25-87. Испытания сельскохозяйственной техники. Оценка эксплуатационных свойств топлива и смазочных материалов.
8. 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.
9. 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.
10. Химченко, А. В. Сравнительная оценка применения полнофакторного эксперимента и метода Соболя для получения уравнения линейной регрессии / А. В. Химченко, И. В. Шилин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 06–07 июня 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 406–414.

#### References

1. Vasilyeva L.S. Automotive operational materials / L.S. Vasilyeva. — М.: Transport, 1986. — 279 p.
2. RD 37.001.019-84 "Methodology for diagnosing the technical condition of automobile diesel engines according to the indicators of working oil", М., 1984
3. 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.
4. 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.
5. Prerequisites For Using a Digital Twin to Determine the Limiting State of Engine Oil or Predict its Remaining Life / A. Khimchenko, V. Orobinsky, V. Ostrikov [and et.] // Science in Central Russia. — 2024. — No 3(69). — С. 148-160. — DOI 10.35887/2305-2538-2024-3-148-160. — EDN DVWSLV.
6. 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.
7. OST 102.25-87. Testing of agricultural machinery. Assessment of the operational properties of fuels and lubricants.

8. 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.

9. 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.

10. Khimchenko, A.V. Comparative assessment of the use of a full-factor experiment and the Sobol method to obtain a linear regression equation / A.V. Khimchenko, I.V. Shilin // Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, June 06-07, 2023. - Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2023. – P. 406–414.

#### **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.

#### **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.

**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): 12.09.2024      Принята к публикации (Accepted): 16.10.2024