

Анализ графика зависимости усилия заглубления пробоотборного зонда от поступательной скорости движения и от площади поперечного сечения зонда показал, что наиболее рациональными параметрами работы пробоотборника являются угол ввода пробоотборного зонда в почву +15°, поступательная скорость в диапазоне от 1,4 до 2,07 м/с и площадь поперечного сечения зонда от 2,61 до 2,76 см<sup>2</sup>.

### Заключение

Обосновывая параметры пробоотборника почвы барабанного типа, оптимизируемой переменной принято минимальное усилие заглубление рабочего органа пробоотборника.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что из исследуемых параметров ( $V_{п}$ ,  $\alpha$ ,  $s$ ) наибольшее влияние на усилия заглубления оказывает угол заглубления пробоотборного зонда  $\alpha$ .

Установлены рациональные конструктивно-технологические параметры работы пробоотборника барабанного типа: угол ввода пробоотборного зонда в почву +15°, поступательная скорость в диапазоне от 1,4 до 2,07 м/с и площадь поперечного сечения зонда от 2,61 до 2,76 см<sup>2</sup>.

### Список использованных источников

1. Midwest laboratory Soil sampling methods / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://midwestlabs.com/wp-content/uploads/2017/01/soil\\_sampling.pdf](https://midwestlabs.com/wp-content/uploads/2017/01/soil_sampling.pdf) – Дата доступа: 30.09.2019.

УДК 629.331

Поступила в редакцию 08.10.2019  
Received 08.10.2019

**В. Е. Тарасенко<sup>1</sup>, А. С. Сай<sup>1</sup>, А. А. Жешко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный аграрный технический университет,

<sup>2</sup>РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В процессе эксплуатации автотракторных двигателей их детали изнашиваются, изменяется их геометрическая форма, увеличиваются зазоры между парами трения. Износ зависит от множества факторов: условий эксплуатации, своевременного и качественного технического обслуживания, качества эксплуатационных материалов, своевременности обнаружения неисправностей и их предупреждения, квалификации оператора и др. С увеличением срока службы и износа двигателя, его использование становится всё более затратным, возрастают расходы на техническое обслуживание и ремонт, а также на комплектующие материалы. Работа движка со скрытыми неисправностями может привести к аварийному изнашиванию и выходу из строя. Ремонт мотора, получившего повреждения, требует больших капитальных вложений.

Диагностические работы сводятся к последовательному выполнению ряда действий и специальных мероприятий, направленных на подтверждение или опровержение предположений о проявившей себя неисправности и причинах её появления. Важно, чтобы были рассмотрены все возможные причины, была правильно определена очерёдность их рассмотрения (по принципу «от простого – к сложному») и применены наиболее действенные, для конкретного случая, методы диагностирования, что позволит сократить время и затраты, а также исключить ошибки.

Работа неисправного двигателя характеризуется рядом внешних проявлений, выражающихся в изменении цвета выхлопных газов, наличии посторонних шумов и стуков, повышенном расходе эксплуатационных материалов, ухудшении основных рабочих характеристик (мощности, крутящего момента и др.).

Однозначного соответствия внешнего признака и неисправности (дефектов) деталей не наблюдается, поэтому требуется причинно-следственный анализ неисправностей.

*Ключевые слова:* дефекты деталей, ресурс, двигатель внутреннего сгорания, техническое обслуживание и ремонт, диагностика.

V. E. Tarasenko<sup>1</sup>, A. S. Say<sup>1</sup>, A. A. Zheshko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UO "Belarusian State Agrarian Technical University,

<sup>2</sup>RUP "SPC NAS of Belarus on the mechanization of agriculture"

Minsk, Republic of Belarus

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR IDENTIFYING DEFECTS AND FORECASTING THE RESIDUAL RESOURCE OF PARTS FOR AUTOTRACTOR ENGINES

During the operation of automotive engines, their parts wear out, their geometric shape changes, the gaps between the friction pairs increase. The wear depends on many factors: operating conditions, timely and quality maintenance, quality performance materials that are timely fault detection and prevention, skilled operator etc. With longer service life engine, its operation becomes more expensive, increasing costs for maintenance and repair, and operating supplies. Operation of the engine with hidden faults may result in emergency wear and engine failure. Repair of the damaged engine requires large capital investments.

Diagnostic work is reduced to the sequential implementation of a number of actions and special measures aimed at confirming or refuting assumptions about the manifested fault and the causes of its occurrence. It is important that all possible causes have been considered, the order of their consideration has been correctly determined (on the principle of "from simple to complex") and the most effective, for a particular case, methods of diagnosis have been applied, which will reduce time and costs, as well as eliminate errors.

The operation of a faulty engine is characterized by a number of external manifestations, expressed in a change in the color of the exhaust gases, the presence of extraneous noises and knocks, increased consumption of operational materials, deterioration of the main operating characteristics (power, torque, etc.). An unambiguous correspondence of the external feature and the malfunction (defects) of the parts is not observed, so a causal analysis of the irregularities is required.

*Keywords:* defects of parts, resource, internal combustion engine, maintenance and repair, diagnostics.

### Основная часть

Разработка методики выявления дефектов по внешнему их проявлению. Процесс определения технического состояния систем и узлов автотракторных двигателей предполагает реализацию некоторого алгоритма диагностирования, который, в общем случае, состоит из совокупности так называемых элементарных проверок сердца машины, правил, устанавливающих последовательность реализации превентивных мер, и правил анализа результатов последних.

Каждый контроль определяется своим воздействием, подаваемым или поступающим на двигатель, составом систем, узлов и механизмов движка, с которых снимаются ответы на это воздействие. Результатом элементарной проверки являются конкретные значения ответных сигналов. Окончательное заключение о техническом состоянии мотора определяется по совокупности полученных результатов.

Наиболее универсальной моделью объекта диагностирования (двигателя) является представление его в виде «черного ящика», в частности – конечного элемента, входные и выходные параметры которого имеют конечное множество значений. Предполагается, что все возможные состояния двигателя образуют конечное множество состояний [5].

В данном случае мотор является «черным ящиком» не потому, что его внутренняя структура и параметры полностью не известны, а потому что накладывается запрет на доступ к ним и состояние движка можно определять, только исследуя его выходные параметры.

Для представления двигателя в виде «черного ящика» (рис. 1) необходимо задать:

а) множество входных воздействий от условий эксплуатации, режимов движения и внешней среды;

б) множество всех выходных (диагностических, внешних проявлений) параметров;

в) множество всех структурных параметров двигателя, его систем, узлов и механизмов.

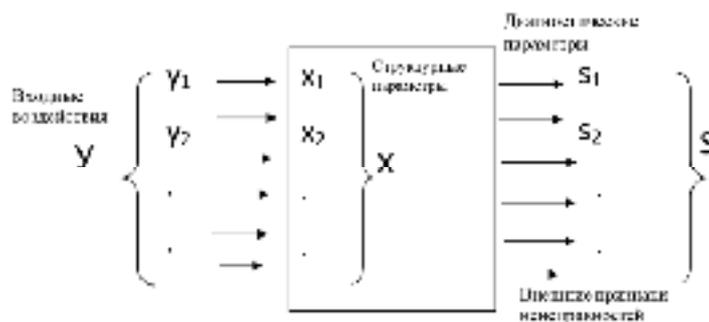


Рис. 1. – Универсальная диагностическая модель автотракторного двигателя.

Задача формулируется по значениям диагностических параметров (внешним признакам неисправностей)  $S_1, S_2, \dots, S_n$  и текущим значениям всех структурных параметров  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , если известны функциональные зависимости между каждым диагностическим сигналом и структурными параметрами:

$$\begin{aligned} S_1 &= \varphi_1(X_1, X_2, \dots, X_m) \\ S_2 &= \varphi_2(X_1, X_2, \dots, X_m) \\ &\dots\dots\dots \\ S_n &= \varphi_n(X_1, X_2, \dots, X_m). \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения (1) есть математическая модель объекта диагностирования, имеющего  $m$  структурных и  $n$  диагностических параметров. Однако практическое использование такой аналитической модели пока ограничено в силу обстоятельств:

- а) вид функций  $\varphi$  для большинства агрегатов и узлов машины пока не установлен;
- б) если функция  $\varphi$  не удовлетворяет условиям непрерывности и дифференцируемости по каждому аргументу, то решение системы наталкивается на большие математические трудности;
- в) многие диагностические параметры в принципе не могут быть выражены в виде аналитических функций.

Наибольшее распространение для взаимосвязи между возможными техническими состояниями (неисправностями) и диагностическими параметрами (внешними признаками) получили диагностические матрицы. Синтез такого рода матриц производится в определённой последовательности:

- составляется полный перечень возможных неисправностей;
- из перечня исключаются редко встречающиеся поломки;
- неисправности отдельных элементов объединяются по технологическим признакам в более крупные;
- необходимо бесконечное множество технических состояний мотора заменить конечным множеством технических состояний, каждое из которых связано с определённой неисправностью.

Диагностическая матрица, по сути дела, является формой записи системы уравнений технологического состояния двигателя, его систем, узлов и механизмов.

Каждому столбцу матрицы соответствует определённая неисправность  $X_i$ . Каждой  $i$ -ой неисправности поставлен в соответствие конкретный внешний признак  $S_i$ , принимающий два значения  $S_i = 0$  при отсутствии или  $S_i = 1$  – при наличии неисправности.

Диагностическая задача формулируется следующим образом:

– по заданным значениям внешнего признака  $S_1, S_2, \dots, S_m$ , полученным при диагностическом обследовании, определить возможные неисправности  $X_1, X_2, \dots, X_n$  в момент проверки матрицы, это можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= f_1(S_1, S_2, \dots, S_m) \\ x_2 &= f_2(S_1, S_2, \dots, S_m) \\ x_n &= f_n(S_1, S_2, \dots, S_m) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Прогнозирование на основе модели диагностирования двигателя, выраженной в виде диагностической матрицы, состоит из следующих этапов:

путём соответствующих измерений устанавливаются значения всех внешних признаков  $S_1, S_2, \dots, S_m$ ;

значения внешних признаков подставляются в матрицу по условию: 0 – если признак не выявляет неисправность; 1 – выявляет.

Под осуществляемостью прогноза следует понимать получение однозначного ответа о техническом состоянии двигателя в рамках принятых допущений о возможных состояниях при наличии любой комбинации значений внешних признаков. Однако метод построения матрицы не гарантирует того, что выбранная совокупность внешних признаков, входящих в исходную максимальную совокупность и достаточных для распознавания заданных неисправностей, является избыточной.

В качестве критериев оптимальности могут быть: минимальное количество признаков; минимальная трудоемкость диагностирования; максимальная достоверность прогнозирования.

Обобщенная диагностическая матрица определения неисправных систем, узлов и механизмов двигателя представлена в табл.1.

Т а б л и ц а 1. – Обобщенная диагностическая матрица определения неисправных систем, узлов и механизмов двигателя

Неисправные системы, узлы и механизмы двигателя	Внешние признаки неисправностей												
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$
$X_1$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
$X_2$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$X_3$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
$X_4$	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1
$X_5$	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
$X_6$	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
$X_7$	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$X_8$	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1
$X_9$	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1

П р и м е ч а н и е:  $X_1$  – износ деталей ЦПГ;  $X_2$  – износ деталей КШМ;  $X_3$  – износ деталей ГРМ;  $X_4$  – повреждение прокладки;  $X_5$  – повреждение прокладки впускного трубопровода;  $X_6$  – неисправности системы питания;  $X_7$  – неисправности системы смазки;  $X_8$  – неисправности системы охлаждения;  $X_9$  – неисправности системы зажигания.  $S_1$  – падение мощности;  $S_2$  – уменьшение крутящего момента;  $S_3$  – повышение расхода топлива;  $S_4$  – повышение уровня и изменение характера шума ДВС;  $S_5$  – изменение химического состава и цвета ОГ;  $S_6$  – изменение количества и давления газов, прорывающихся в картер;  $S_7$  – изменение давления газов в цилиндре в конце такта сжатия;  $S_8$  – изменение величины утечки воздуха из цилиндров;  $S_9$  – изменение разряжения во впускном трубопроводе;  $S_{10}$  – изменение давления в масляной магистрали;  $S_{11}$  – изменение объема подаваемого топлива;  $S_{12}$  – изменение давления или разряжения в системе питания;  $S_{13}$  – перегрев двигателя.

Оптимизация диагностической матрицы осуществляется в пять этапов.

1) На первом этапе в исходной матрице проверяют выполнение условия различности неисправностей. При невыполнении условия различности все строки с одинаковыми комбинациями 1 и 0. Затем, в каждой группе, оставляется одна любая строка.

2) На втором этапе множество внешних признаков исходной матрицы разбивают на группы, включая столбцы с одинаковыми комбинациями 0 и 1. В каждой группе оставляется один столбец, остальные вычеркиваются. В примере: 2 группы ( $S_1, S_2, S_5$  и  $S_{11}, S_{12}$ ). Оставляем два столбца  $S_7$  и  $S_{11}$ .

3) На третьем этапе выявляют внешние признаки, которые имеют во всех строках 1, они не несут какой-либо информации и могут быть вычеркнуты ( $S_4$ ).

4) На четвертом этапе записывают выражения для всех неисправностей, т. е. все внешние признаки, которые их различают:

$$\begin{aligned}
X_1 &= S_1 S_3 S_6 S_7 S_8 S_9 S_{10}, & X_2 &= S_{10}, & X_3 &= S_1 S_3 S_6 S_7 S_8 S_9 S_{10} S_{13}, \\
X_4 &= S_1 S_3 S_7 S_8 S_9 S_{13}, & X_5 &= S_1 S_3 S_9, & X_6 &= S_1 S_3 S_7 S_8 S_9 S_{11} S_{13}, & X_7 &= S_3 S_9 S_{13}, \\
X_8 &= S_1 S_3 S_{10} S_{13}, & X_9 &= S_1 S_3 S_7 S_9 S_{13}.
\end{aligned}$$

Объект работоспособен только тогда, когда отсутствуют все возможные неисправности, т.е. функцию работоспособности получаем, используя теорему булевой алгебры  $A = A + \overline{A}B$ .

5) На пятом этапе определяются функции различимости:

$$\begin{aligned}
f_{1,2} &= S_1 S_3 S_6 S_7 S_8 S_9, & f_{1,3} &= S_{13}, & f_{1,4} &= S_6 S_{10} S_{13}, \\
f_{1,5} &= S_6 S_7 S_8 S_{10}, & f_{1,6} &= S_6 S_7 S_8 S_{10} S_{11} S_{13}, & f_{1,7} &= S_1 S_6 S_7 S_8 S_9 S_{13}, \\
f_{1,8} &= S_6 S_7 S_8 S_9 S_{13}, & f_{1,9} &= S_6 S_8 S_{10} S_{13}.
\end{aligned}$$

Признак определяется логическим сложением столбцов. Например, если  $S_1$  для неисправностей  $X_1$  и  $X_2$  равен 1,1 или 0,0, то он отбрасывается, а если 0 и 1, то остается и записывается в функцию.

Если множества чисел  $M_p$  и  $M_q$ , образующие любые две строки  $p$  и  $q$  удовлетворяют условию  $M_p \square M_q$ , то строка  $q$  удаляется, т. е. в выше указанной функции остается только  $f_{1,3} = S_{13}$ .

Для приведенного примера остается только шесть функций  $f_{3,4} = S_6 S_{10}$ :

$$f_{4,9} = S_{11}; f_{6,9} = S_{11}; f_{7,8} = S_{11}; f_{8,9} = S_7 S_9 S_{10}.$$

Для определения локализирующих множеств найдем нулевое произведение функций:

$$\begin{aligned}
F &= S_1 S_8 S_{11} S_{13} (S_6 + S_{10})(S_7 + S_9 + S_{10}) = S_1 S_8 S_{11} S_{13} [S_{10} + S_6(S_7 + S_9)] = \\
&= S_1 S_8 S_{11} S_{13} S_{10} + S_1 S_8 S_{11} S_{13} S_6 S_7 + S_1 S_8 S_{11} S_{13} S_6 S_9.
\end{aligned} \tag{3}$$

Приведенную методику можно использовать не только для выявления неисправных систем, узлов и механизмов двигателя, но и для выявления неисправных деталей внутри системы со своим набором внешних признаков. Анализ таких диагностических матриц представляет трудоемкую задачу, поэтому необходимо разработать программу причинно-следственного анализа внешних признаков с одной стороны и дефектов деталей, с другой стороны.

Для нашего случая задача состоит в том, чтобы по дефектам детали (например, поршня двигателя) установить взаимосвязь между сопряженными комплектующими и их возможными неисправностями (дефектами) с одной стороны, и с другой – параметрами функционирования сборочной единицы (например, двигатель) в целом.

Рассмотрение наиболее часто встречающихся повреждений деталей двигателей осуществлено в рамках выполнения 3-го этапа ГПНИ по теме «Разработка методики комплексного диагностирования дизельных двигателей, узлов и агрегатов для определения их остаточного ресурса, обеспечения долговечности, безотказности и экономичности». При этом изучены: абразивный износ деталей двигателя из-за попадания загрязнений; последствия попадания топлива в моторное масло; повышенный расход масла; сквозной прожиг днища поршня двигателя; разрушение перемычки поршневых колец; трещины на днище поршня; задир поршня (только на участке юбки поршня); задир поршня в диагональном направлении рядом с отверстием для поршневого пальца; несимметричное пятно контакта на юбке поршня; задир только на нижнем участке юбки поршня; сильный износ юбки поршня с шершавой и матовой поверхностью; одностороннее широкое заполированное пятно контакта и борозды на юбке поршня; сильный износ канавок поршневых колец и самих поршневых колец; раковины на внешней стенке гильз цилиндров (кавитация).

Причиной дефектов деталей ЦПГ служат неисправности других систем и узлов двигателя. Не видя этой взаимосвязи невозможно провести качественный ремонт, даже используя для замены новые или отремонтированные комплектующие. Здесь можно использовать диагностические матрицы для прослеживания причинно-следственных связей.

Рассмотрим построение модели (табл. 2) на примере одного из дефектов поршня двигателя (сквозной прожиг днища поршня –  $X_1$ ), при котором присутствовало описание дефектов сопряженных деталей (отложение нагара на распылителе форсунки –  $V_1$ , выход из строя охлаждающей форсунки –  $V_2$ , засорение масляных каналов –  $V_3$ ) и др.).

Оптимизация матрицы взаимодействия дефектов: На первом этапе в исходной матрице проверяют выполнение условия различности дефектов. При невыполнении условия различности определяют все строки с одинаковыми комбинациями 1 и 0. Затем в каждой группе остается одна строка.

На втором этапе множество дефектов сопряженных деталей исходной матрицы разбивают на группы, включая столбцы с одинаковыми комбинациями 0 и 1. В каждой группе оставляется один столбец.

На третьем этапе выявляют дефекты взаимосвязанных деталей, которые имеют во всех строках 1 или 0, они не несут какой-либо информации и могут быть вычеркнуты (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. – Обобщенная матрица взаимодействия дефектов ЦПГ и взаимосвязанных с ними деталей, систем двигателя

Дефекты ЦПГ двигателя	Дефекты взаимосвязанных деталей																		
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$	$Y_9$	$Y_{10}$	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{13}$	$Y_{14}$	$Y_{15}$	$Y_{16}$	$Y_{17}$	$Y_{18}$	$Y_{19}$
$X_1$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$X_2$	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$X_3$	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$X_4$	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$X_5$	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$X_6$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$X_7$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$X_8$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$X_9$	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$X_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$X_{11}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$X_{12}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$X_{13}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$X_{14}$	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$X_{15}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Дефекты поршня:  $X_1$  – абразивный износ на поршне, проявляющийся в образовании глубоких борозд в продольном направлении;  $X_2$  – широкое пятно контакта и борозды на юбке поршня;  $X_3$  – борозды и подгоревшие участки на поршневых кольцах, борозды и задиры на поверхности цилиндра;  $X_4$  – точечная коррозия в отверстии для поршневого пальца;  $X_5$  – сквозной прожиг днища поршня;  $X_6$  – разрушение перемычки поршневых колец;  $X_7$  – трещины на днище поршня;  $X_8$  – задиры поршня (только на участке юбки поршня);  $X_9$  – односторонний задиры на юбке поршня;  $X_{10}$  – задиры поршня в диагональном направлении рядом с отверстием для поршневого пальца;  $X_{11}$  – несимметричное пятно контакта на юбке поршня;  $X_{12}$  – задиры только на нижнем участке юбки поршня;  $X_{13}$  – сильный износ юбки поршня с шершавой и матовой поверхностью;  $X_{14}$  – одностороннее широкое заполированное пятно контакта и борозды на юбке поршня;  $X_{15}$  – сильный износ канавок поршневых колец и самих поршневых колец.

Дефекты взаимосвязанных деталей:  $Y_1$  – негерметичность системы впуска;  $Y_2$  – выход из строя воздушного фильтра;  $Y_3$  – загрязнение каналов системы смазки (несвоевременная замена масла);  $Y_4$  – попадание топлива в моторное масло;  $Y_5$  – ухудшение распыла топлива форсунками;  $Y_6$  – низкое давление сжатия (негерметичность клапанов, прокладки головки блока, изменение фаз газораспределения);  $Y_7$  – высокое давление наддува;  $Y_8$  – высокая температура воздуха на впуске;  $Y_9$  – повышенный расход масла;  $Y_{10}$  – местный перегрев двигателя (неисправность термостата, привода вентилятора);  $Y_{11}$  – выход из строя форсунок охлаждения поршней;  $Y_{12}$  – низкое октановое число топлива, свечей зажигания;  $Y_{13}$  – зависание иглы форсунки;  $Y_{14}$  – низкая температура воздуха на впуске;  $Y_{15}$  – богатая топливная смесь;  $Y_{16}$  – низкий уровень масла;  $Y_{17}$  – неисправности КШМ (монтажный зазор поршневого пальца, деформация шатуна, неравномерный износ шеек коленчатого вала, неправильная затяжка болтов);  $Y_{18}$  – закоксовывание поршневых канавок;  $Y_{19}$  – нарушение посадки гильзы цилиндров.

На четвертом этапе записывают выражения для взаимосвязи всех дефектов:

$$X_1 = Y_1 Y_3 \text{ (наряду с дефектом } X_1, \text{ аналогичную зависимость имеют дефекты } X_{13}, X_{15});$$

$$X_2 = Y_4 Y_5 Y_6; \quad X_5 = Y_3 Y_{10} Y_{11} Y_{12}; \quad X_6 = Y_6 Y_{12}; \quad X_7 = Y_{10} Y_{11} Y_{15}; \quad X_8 = Y_{10};$$

$$X_9 = Y_3 Y_4 Y_{11} Y_{16}; \quad X_{10} = Y_{17}; \quad X_{12} = Y_{19}; \quad X_{14} = Y_4 Y_6 Y_{15}.$$

Результаты оптимизации по дефектам взаимосвязанных деталей двигателя представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. – Результаты оптимизации по дефектам взаимосвязанных деталей двигателя.

Дефекты ЦПГ двигателя	Дефекты взаимосвязанных деталей																		
	Y <sub>1</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>	Y <sub>10</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>14</sub>	Y <sub>15</sub>	Y <sub>16</sub>	Y <sub>17</sub>	Y <sub>18</sub>	Y <sub>19</sub>	
X <sub>1</sub>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X <sub>2</sub>	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X <sub>5</sub>	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X <sub>6</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
X <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X <sub>9</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
X <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
X <sub>12</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
X <sub>14</sub>	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Объект работоспособен только тогда, когда отсутствуют все возможные неисправности, т.е. функция различимости дефектов:

$$F_p = X_1 \vee X_2 \vee \dots \vee X_{14}. \quad (4)$$

На пятом этапе определяются функции различимости  $f_{i,k}$ :

$f_{12} = Y_1 Y_3 Y_4 Y_5 Y_6$ ; Это означает что дефекты  $X_1$  и  $X_2$  базовой детали происходят по причине отказов взаимосвязанных деталей  $Y_1, Y_3, Y_4, Y_5$  и  $Y_6$ , они косвенно на это указывают. Аналогично:

$$f_{16} = Y_1 Y_{10} Y_{11} Y_{12}; \quad f_{17} = Y_1 Y_3 Y_{10} Y_{11}; \quad f_{18} = Y_1 Y_3 Y_{10}; \quad f_{19} = Y_1 Y_4 Y_{11} Y_{16};$$

$$f_{110} = Y_1 Y_3 Y_{17}; \quad f_{112} = Y_1 Y_3 Y_{19}; \quad f_{14} = Y_1 Y_3 Y_4 Y_6 Y_{15}.$$

Построение функции основано на том, что если признак  $Y_i$  для  $X_1$  и  $X_2$  равен 1,1 или 0,0, то он отбрасывается, если 0 и 1, то остается и записывается в функцию.

Предложенная методика, по мере накопления информационной базы описания дефектов деталей и причин их возникновения, позволяет повысить надежность работы машин за счет прогнозирования и своевременного устранения причин их возникновения, что особенно важно при текущем ремонте машин.

*Прогнозирование остаточного ресурса деталей автотракторных двигателей.* Перспективным является метод прогнозирования остаточного ресурса машин по тенденции (тренду) изменения их технического состояния [6, 7].

Характер изменения параметра технического состояния  $U(t_k)$  после наработки  $t_k$  в общем виде выражается следующей зависимостью:

$$U(t_k) = V_C t_k^\alpha, \quad (5)$$

где  $V_C$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения параметра;  $\alpha$  – показатель степени изменения параметра технического состояния.

Показатель степени  $\alpha$  определяется заранее, на основе полученных в реальных условиях эксплуатации статистических данных о закономерностях изменения параметров технического состояния в зависимости от наработки.

При  $\alpha > 1$  и  $\alpha < 1$  зависимость значений параметров технического состояния составных частей машин от наработки носит криволинейный характер, причем в первом случае ( $\alpha > 1$ ) кривая обращена выпуклостью вниз, во втором ( $\alpha < 1$ ) – вверх. При  $\alpha = 1$  указанная зависимость имеет линейный вид. Экспериментально были получены ориентировочные значения для некоторых параметров технического состояния.

Предельные значения параметров технического состояния составных частей машин  $\Pi_{пр}$  рассчитывают заранее с учетом критерия безопасности работы  $\Pi_{пб}$ , способности выполнять рабочие функции в течение заданной наработки  $\Pi_{пт}$ , минимальных удельных издержек на эксплуатацию  $\Pi_{пз}$  и технологического критерия  $\Pi_{пт}$  (например, по началу форсированного износа).

Предельные значения параметров зависят от конкретных условий работы машины и их составных частей, и, как следствие этого, применяются только для таких подобных критериев эксплуатации. Это затрудняет разработку единой методики определения предельных значений параметров технического состояния машин, а также их составных частей. Проблема в разработке еще и в том, что для оценки надежности сложной машины, необходимо одновременно устанавливать предельное значение всех тех параметров составных частей, от которых зависит работоспособность машины в целом.

Предельные значения параметров технического состояния составных частей машин устанавливают приближенно, по аналогии с ранее выпущенными машинами расчетным, экспериментальным или расчетно-экспериментальным способами.

Предельное изменение параметра технического состояния  $U_{пр}$  и изменение параметра  $U(t_k)$  после наработки  $t_k$  находят в зависимости от характера изменения параметра опции сборочной единицы. Если значение параметра с ростом наработки увеличивается, то:

$$U_{пр} = \Pi_{пр} - \Pi_{н}; U(t_k) = \Pi(t_k) - \Pi_{н}. \quad (6)$$

В тех случаях, когда значение параметра с ростом наработки уменьшается, то:

$$U_{пр} = \Pi_{н} - \Pi_{пр}; U(t_k) = \Pi_{н} - \Pi(t_k). \quad (7)$$

Техническое состояние сборочных единиц машин прогнозируют по фактическим данным изменения показателей надежности составных частей конкретной машины и среднестатистическим методом.

Методика определения остаточного ресурса зависит от характера изменения параметра технического состояния в функции наработки и ряда других факторов. Прогнозирование по фактическому изменению параметров технического состояния составных частей машин содержит как положительные, так и отрицательные стороны. Плюсом этого метода является то, что он позволяет более полно использовать ресурс комплектующих деталей. К недостаткам относят трудности, связанные с учетом измеряемых параметров и обработкой результатов измерения.

Поэтому указанный метод диагностирования рекомендуется применять для таких составных частей, срок безотказной работы которых определяет межремонтный ресурс сборочной единицы или машины в целом (кривошипно-шатунный механизм дизеля, шестерни и подшипники ходового механизма и трансмиссии и др.).

Среднестатистическое прогнозирование основано на разработке и внедрении единых допустимых значений параметров технического состояния, а также единой периодичности обслуживания для одноименных составных частей однотипных машин. Сущность этого метода заключается в сопоставлении результатов замера значений параметров технического состояния составных частей сборочных единиц с допустимыми или предельными значениями. При этом для мастера-диагноста, допустимые показатели качественного состояния комплектующих деталей являются инструктивными и позволяют делать общее заключение о состоянии объекта диагностирования, не проводя никаких расчетов. Так, если измеренное значение параметра больше допустимого или равно предельному значению, то объект подлежит обслуживанию или ремонту. Если же измеренное значение меньше допустимого или равно ему, то объект не требует никаких воздействий до очередной проверки.

Для среднестатистического прогнозирования характерно то, что ресурс параметра технического состояния составных частей машин используется полностью только в том случае, если к моменту контроля он достигает предельных значений. В остальных случаях имеет место недоиспользование ресурса или отказ. Последнее служит существенным недостатком среднестатистического прогнозирования. Однако относительная простота и доступность этого метода делают его весьма распространенным.

## Заключение

Разработана математическая модель, описывающая взаимосвязь между возможными состояниями автотракторных двигателей и внешними признаками. Анализ причинно-следственных связей осуществляется на основе диагностических матриц, позволяющих выявлять цепь многочисленных взаимосвязей между внешним (диагностическим) признаком, причинами и неисправными системами двигателя, дефектами деталей. При дефектации деталей, диагностическая матрица позволяет прогнозировать техническое состояние сопряженных деталей сборочной единицы, без чего невозможно обеспечить высокое качество ремонта. По мере накопления информационной базы описания дефектов деталей и причин их возникновения повышается достоверность технического прогноза, методика позволяет повысить надежность работы машин за счет прогнозирования и своевременного устранения причин возникновения неисправностей.

## Список использованных источников

1. Северный, А. Э. Руководство по техническому диагностированию при техническом обслуживании и ремонте тракторов и сельскохозяйственных машин / А. Э. Северный, Д. С. Буклагин, В. М. Михлин [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 252 с.
2. Система технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин по результатам диагностирования. – М.: Информагротех, 1995. – 64 с.
3. Петров, А. Д. Техническое диагностирование автомобилей: Учеб. пособие для сред. сел. проф.-техн. училищ. – М.: Высш. Школа, 1979. – 45 с.
4. ГОСТ 23435-79 Техническая диагностика. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Номенклатура диагностических параметров. М., 1979. – 8 с. Дата последнего изменения 12.09.2018.
5. Савич, Е. Л. Техническая эксплуатация автомобилей: учебное пособие в 3 ч. Ч.1 Теоретические основы технической эксплуатации / Е. Л. Савич, А. С. Сай. – Мн., Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2015. – 427 с.
6. Баженов, Ю. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов автомобилей в условиях эксплуатации / Ю. В. Баженов, М. Ю. Баженов // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 4. – С. 16–21.
7. РД 26.260.004-91 Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. – М., 1991. – 98 с.
8. Способ определения остаточного ресурса двигателя внутреннего сгорания: а. с. 1682853 СССР, МКИ5 G 01 M 15/00 / Е. Н. Андрусенко. – № 972297; заявл. 22.05.89; опубл. 07.10.91 // *Открытия. Изобрет.* – 1991. – № 37.
9. Дунаев, А. В. Выбор методов и средств диагностирования цилиндропоршневой группы автотракторных двигателей / А. В. Дунаев // *Техника в сельском хозяйстве*, 2007. – № 6. – С. 25–28.
10. Способ определения остаточного ресурса цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания: пат. № 2479830 и № 2479831 Рос. Федерация: МПК G01M15/04 (2014.08) / Черноиванов В. И., Дунаев А. В., заявитель и патентообладатель ГОСНИТИ. – № 2011117414/06 и № 2011117415/06; заявл. 04.05.2011; опубл. 20.04.2013. – 8 с.

УДК 631.363

Поступила в редакцию 20.09.2019  
Received 20.09.2019

**Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд**

*БГАТУ  
г. Минск, Республика Беларусь*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЗЕРНА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В статье представлены результаты экспериментального исследования по разрушению зерна при динамическом воздействии. Получены уравнения регрессии описывающие зависимость степени деформации зерновки от скорости и силы воздействия на нее. На основании полученных уравнений построены и проанализированы графические зависимости, показывающие влияние силы и скорости на степень деформации зерна, анализ которых позволил сделать вывод о том, что скорость воздействия на зерновку оказывают существенное воздействие на степень деформации зерновки. В процессе исследования установлено, что при динамическом разрушении зерновки сила сжатия для всех видов исследуемого зерна ниже, чем при статическом разрушении.

*Ключевые слова:* зерно, разрушение, динамическое воздействие, регрессионный анализ.