

В. Е. Тарасенко¹, А. А. Жешко², А. Л. Барташевич³

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: trs9@yandex.by

²РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: azeshko@gmail.com

³РО «Белгросервис»

Минская область, г. Фаниполь

Республика Беларусь

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОТКАЗАМИ ТОПЛИВНЫХ НАСОСОВ ДИЗЕЛЕЙ

Аннотация. Выполнены этапы математической обработки данных наблюдений за отказами топливных насосов гарантийных дизелей Д-245, определены числовые характеристики случайной величины с целью идентификации закона распределения. Определены данные для расчета теоретической кривой нормального закона распределения.

Ключевые слова: отказ, двигатель, насос, закон, интервал, частота, величина.

V. E. Tarasenko¹, A. A. Zheshka², A. L. Bartashevich³

¹UI “Belarusian State Agrarian Technical University”

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: trs9@yandex.by

²RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: azeshko@gmail.com

³RA “Belagroservice Republican Association”

Minsk region, Fanipol

Republic of Belarus

MATHEMATICAL PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA ON FAILURES OF DIESEL FUEL PUMPS

Abstract. The stages of mathematical processing of data on observations of failures of fuel pumps of warranty diesel engines D-245 have been performed, numerical characteristics of a random variable have been determined in order to identify the distribution law. The data for calculating the theoretical curve of the normal distribution law are determined.

Keywords: failure, motor, pump, law, interval, frequency, magnitude.

Введение

Известно, что средний массовый результат множества случайных явлений оказывается практически неслучайным, предсказуемым. Это является базой для практического применения вероятностных (статистических) методов исследования [1]. Одной из главных задач статистической обработки данных является выбор того или иного закона распределения для исследования случайной величины. Существует несколько критериев, по которым можно осуществить предварительный выбор закона распределения случайной величины:

- на основании данных о механизме образования случайной величины;
- путем анализа гистограммы и полигона частот: если гистограмма колоколообразная, то в первом приближении можно говорить о нормальном законе распределения случайной величины;
- по величине коэффициента вариации (таблица 1).

Таблица 1 – Соотношение коэффициента вариации и закона распределения

Коэффициент вариации v	Вид закона распределения
0,08–0,40	нормальный закон
0,40–0,85	закон Вейбулла
0,35–0,80	логарифмический закон
0,60–1,30	экспоненциальный закон

Примечание: составлено на основе [1].

В практических задачах наряду с представленными законами распределения случайных величин достаточно широкое распространение получили законы: логарифмически-нормальный, Рэлея, гамма-распределение, «х-квадрат» и др. Для решения реже встречающихся практических задач могут быть использованы еще свыше двадцати законов распределения [1, 2]. Большинство из них математически взаимосвязаны, и практически любой с помощью справочных зависимостей может быть трансформирован в более известный закон.

Законы распределения имеют большое значение для теории и практики с точки зрения оценки и обеспечения показателей надежности объекта. Они позволяют осуществлять контроль уровня надежности в эксплуатационных условиях, оценивать возможности дальнейшего увеличения ресурса, определять необходимость выполнения работ по совершенствованию мобильных машин и по повышению уровней их показателей надежности [2, 3].

Основная часть

Согласно статистической информации службы сервиса ОАО «МТЗ» в разрезе трех лет, в течение которых осуществлялись статистические наблюдения (2021–2023 гг.), порядка 30 % отказов касается системы питания топливом, свыше 20 % отказов приходится на топливные насосы (таблица 2). По данным источников [4, 5, 6] на долю топливной аппаратуры приходится 40–50 % (45–60 %) всех отказов автотракторных двигателей. Среди основных отказов двигателей энергонасыщенных тракторов порядка 37 % приходится на топливные насосы высокого давления (ТНВД) [7]. По данным ученых, занимающихся вопросами надежности автотракторной техники, существенная доля отказов дизеля (20–30 %) приходится на топливную аппаратуру, а при эксплуатации в тяжелых условиях она достигает 50 % [8].

Таблица 2 – Статистические данные по свершившимся отказам составляющих компонентов двигателей Д-245 в гарантийный период за 2021–2023 гг. по регионам Беларуси (информация службы сервиса ОАО «МТЗ»)

Повторяющиеся выходы из строя, свершившиеся отказы составляющих компонентов двигателей Д-245	2021	2022	2023
Генератор	59	43	49
Стартер	19	24	12
Свечи накала	7	11	7
Насос топливный	85	53	47
Пневмокомпрессор	9	10	11
Картер	45	31	12
Кронштейн крепления генератора	20	13	13
Термостат	10	9	14
Форсунки	26	13	13
Насос шестеренный	13	8	20
Насос водяной	8	7	16
Всего	301	222	214

При сопоставлении статистических данных по отказам составляющих компонентов двигателей Д-245 и Д-260 в гарантийный период эксплуатации (2021–2023 гг.) следует отметить, что численность свершившихся отказов компонентов топливной аппаратуры дизелей Д-260 существенно ниже (таблица 3). Так, число отказов топливных насосов (насосы РР6М10Р1F-3492, РР6М10Р1Т-3395) по дизелям Д-260 (во многих случаях дизеля Д-260.2S2-478) не превышает 12 % от общей численности зафиксированных отказов.

Таблица 3 – Статистические данные по свершившимся отказам составляющих компонентов двигателей Д-245 и Д-260 в гарантийный период за 2021–2023 гг. по регионам Республики Беларусь (информация службы сервиса ОАО «МТЗ»)

Повторяющиеся выходы из строя, свершившиеся отказы составляющих компонентов двигателей Д-245 и Д-260	2021		2022		2023	
	Д-245	Д-260	Д-245	Д-260	Д-245	Д-260
Генератор	59	62	43	52	49	42
Стартер	19	15	24	35	12	32
Свечи накала	7	39	11	39	7	29
Насос топливный	85	29	53	26	47	19
Пневмокомпрессор	9	27	10	25	11	21
Картер	45	0	31	0	12	2
Кронштейн крепления генератора	20	0	13	10	13	6
Термостат	10	14	9	7	14	8
Форсунки	26	26	13	9	13	10
Насос шестеренный	13	5	8	8	20	10
Насос водяной	8	9	7	8	16	9
Всего	301	226	222	219	214	188

Целью математической обработки данных наблюдений за отказами топливных насосов является определение числовых характеристик случайной величины с целью идентификации закона распределения. Фрагмент массива данных по отказам топливных насосов (насосы 4УТНИ-1111007-420.1 АО «НЗТА», г. Ногинск, Россия, насосы РР4М10Р1i-3701 «MOTORPAL a.s.», Чехия) тракторных дизелей Д-245 (Д-243) по регионам Республики Беларусь за 2023 г. представлен в таблице 4. Общая выборка данных состоит из 36 зафиксированных отказов.

Первые этапы математической обработки данных наблюдений – формирование первичной статистической совокупности (таблица 5) и упорядоченной статистической совокупности (таблица 6).

При этом наибольшим и наименьшим значениями исходных данных являются следующие величины:

$$x_{\min} = 3\,750; x_{\max} = 4\,733.$$

Размах варьирования выборки определяли как разницу между наибольшим и наименьшим значениями исходных данных

$$R = x_{\max} - x_{\min}.$$

$$R = 4\,733 - 3\,750 = 983.$$

Количество интервалов группирования определяли по зависимости (1)

$$K = 1 + 3,3 \lg n.$$

$$K = 1 + 3,3 \lg 36 = 6,135.$$
(1)

Принимаем $K = 6$.

Величину интервала группирования определяли по зависимости (2)

$$H = R/K.$$

$$H = 983/6 = 163,84.$$
(2)

Принимаем $H = 164$.

Таблица 4 – Фрагмент массива данных по отказам топливных насосов тракторных дизелей Д-245 и Д-243 по регионам Республики Беларусь за 2023 г.

Конструкторский элемент	Категория	Способ устранения	Техцентр	Область техцентра	Район владельца	Владелец	Модель трактора	Винкод продукции	Наработка
515458 # Дизель Д-245S2-3541, ТУ РБ 101 326 441.140- 2004	2	Ремонт	Филиал ОАО «МТЗ» «Торговый Дом BELARUS» Отделение по Гродненской области	Гродненская	Вороновский	КСУП «Мисевичи»	1025.3	У4R102 502M1 100 099	4417
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Дрогичинский	ОАО «Осиповичи»	82.1	У4R900Z01M1 105 142	3970
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Пружанский	Филиал «АгроэнергоЗеленевиичи» РУП «Брестэнерго»	82.1	У4R900Z01M1 106 803	4570
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Пружанский	ОАО «Ровбицкое»	82.1	У4R900Z01M1 106 746	3794
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Жабинковский	ОАО «Ракитница»	82.1	У4R900Z01M1 105 744	4050
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Пружанский	ОАО «Ровбицкое»	82.1	У4R900Z01M1 106 746	4020
240-0 000 100-92 # Дизель Д-243	1	Ремонт	ОАО «Заднепровский межрайагросервис»	Могилевская	Костюкович- ский	КСУП «Демидовичский»	82.1	У4R900Z01M1 109 046	3750
514 745 # Дизель Д-243S2-1581, ТУ РБ 05 786 459.111-2000	2	Замена	ОАО «Витебский завод тракторных запасных частей»	Витебская	Толочинский	ОАО «Обольцы»	82.1	У4R900Z01M1 108 851	4036
514 747 # Дизель Д-243S2-1583, ТУ РБ 05 786 459.111-2000	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Пружанский	Филиал «Агроэнерго Зеленевиичи» РУП «Брестэнерго»	82.1	У4R900Z01M1 106 803	4183

Таблица 5 – Первичная статистическая совокупность

№ события	Наработка до отказа, ч	№ события	Наработка до отказа, ч	№ события	Наработка до отказа, ч	№ события	Наработка до отказа, ч
1	4 417	10	4 183	19	3 955	28	3 750
2	3 970	11	4 326	20	4 304	29	4 142
3	4 570	12	3 849	21	4 237	30	3 755
4	3 794	13	3 875	22	4 104	31	4 565
5	4 185	14	4 161	23	4 132	32	4 383
6	4 050	15	4 020	24	4 103	33	4 328
7	4 020	16	4 545	25	4 399	34	4 539
8	3 750	17	4 073	26	4 250	35	4 733
9	4 036	18	4 722	27	3 760	36	4 125

Таблица 6 – Упорядоченная статистическая совокупность

Порядковый номер	Наработка до отказа, ч	Порядковый номер	Наработка до отказа, ч	Порядковый номер	Наработка до отказа, ч	Порядковый номер	Наработка до отказа, ч
1	3 750	10	4 020	19	4 142	28	4 383
2	3 750	11	4 020	20	4 161	29	4 399
3	3 755	12	4 036	21	4 183	30	4 417
4	3 760	13	4 050	22	4 185	31	4 539
5	3 794	14	4 073	23	4 237	32	4 545
6	3 849	15	4 103	24	4 250	33	4 565
7	3 875	16	4 104	25	4 304	34	4 570
8	3 955	17	4 125	26	4 326	35	4 722
9	3 970	18	4 132	27	4 328	36	4 733

Центр распределения выборки находили из отношения (3):

$$D = (x_{\max} + x_{\min}) / 2. \quad (3)$$

$$D = (4 733 + 3 750) / 2 = 4 241,5.$$

Далее производили расчет частот, частостей, накопленных частот, накопленных частостей, плотности распределения частот и частостей. Результаты заносили в сводную таблицу 7.

Таблица 7 – Упорядоченная статистическая совокупность

№	Границы интервалов	Средины интервалов x	Частоты n_i	Частости $P_i = n_i/n$	Накопленные частоты H_i	Накопленные частости $P_H = H_i/n$	Плотность частот $F = n_i/h$	Плотность частостей $F_n = P_i/h$
1	3750–3914	3 832	7	0,19 444 444	7	0,19 444 444	0,04 268 293	0,0 011 856
2	3914–4078	3 996	7	0,19 444 444	14	0,38 888 889	0,04 268 293	0,0 011 856
3	4078–4242	4 160	9	0,25	23	0,63 888 889	0,05 487 805	0,0 015 244
4	4242–4406	4 324	6	0,16 666 667	29	0,80 555 556	0,03 658 537	0,0 010 163
5	4406–4570	4 488	5	0,13 888 889	34	0,94 444 444	0,0 304 878	0,0 008 469
6	4570–4734	4 652	2	0,05 555 556	36	1	0,01 219 512	0,0 003 388
			$\Sigma = 36$	$\Sigma = 1$				

На основании полученных выше данных выполнили построение гистограммы (рисунок 1), ломаной кумуляты (рисунок 2), полигона (рисунок 3) и ступенчатой кумуляты (рисунок 4).

Определяли числовые характеристики эмпирического распределения. Определение математического ожидания

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4)$$

где $\bar{X}$ – математическое ожидание; n – объем выборки; x_i – случайная величина.

$$\bar{X} = 4 169,7222.$$

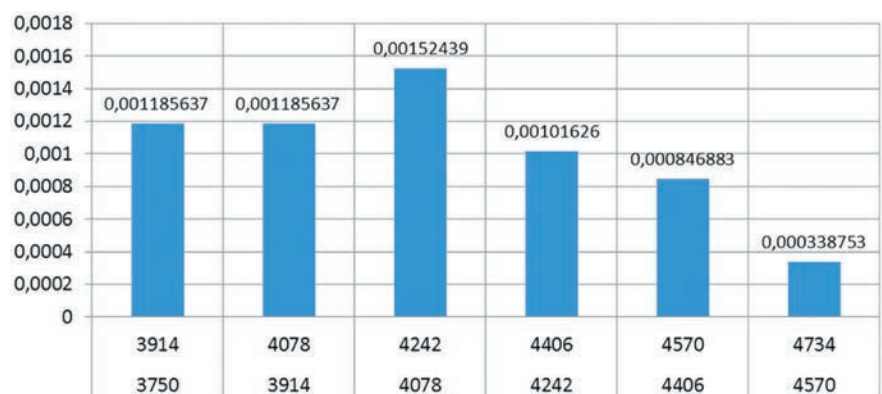


Рисунок 1 – Гистограмма

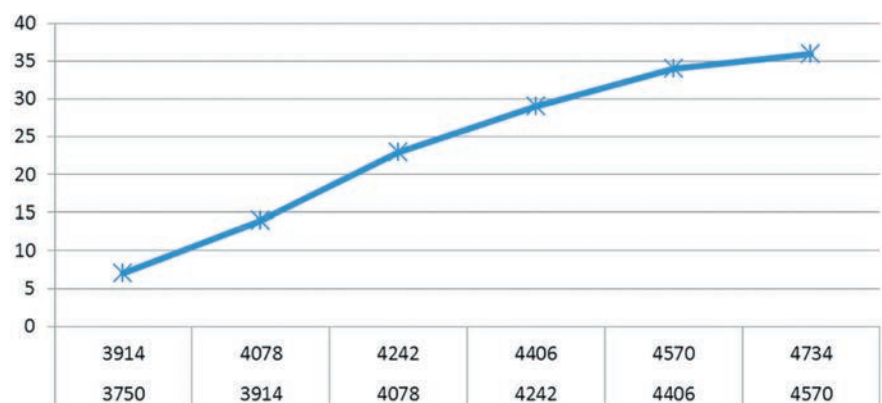


Рисунок 2 – Ломаная кумулята

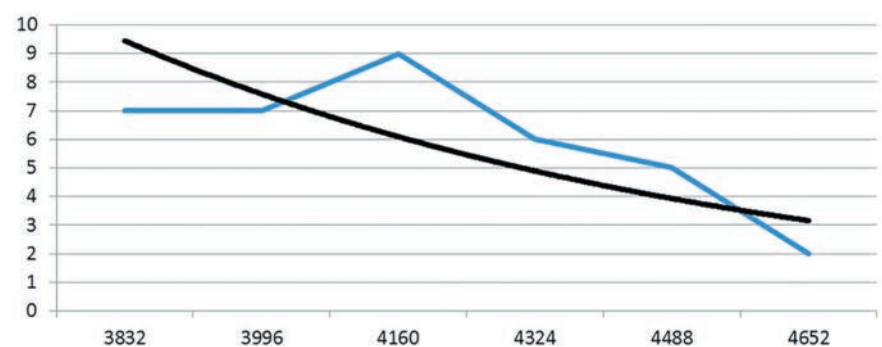


Рисунок 3 – Полигон

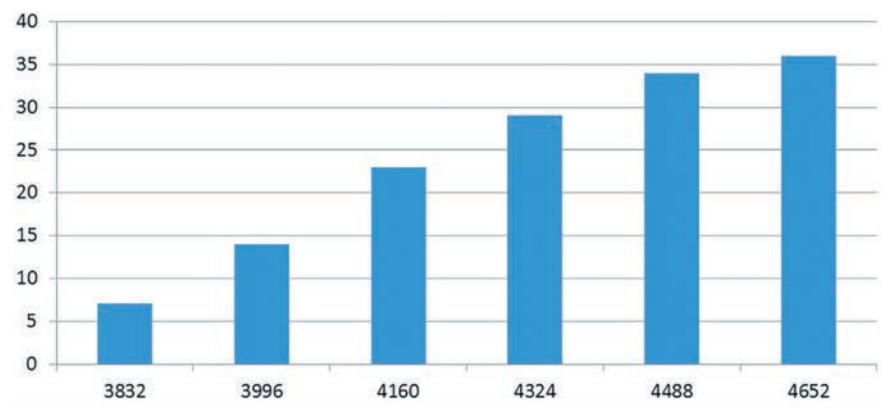


Рисунок 4 – Ступенчатая кумулята

Дисперсия D определяется по зависимости (5)

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2. \quad (5)$$

$$D = 76\,073,578.$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО) определили

$$\sigma = \sqrt{D}.$$

$$\sigma = 275,8143901.$$

Коэффициент вариации нашли из соотношения (6)

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}}. \quad (6)$$

$$V = 6,614694586.$$

где σ – среднее квадратическое отклонение (СКО); $\bar{X}$ – математическое ожидание.

Определение медианы (аналитическое и графическое). Аналитическое определение медианы. Находим интервал, содержащий медиану, путем использования накопленных частот H_i . Медианному интервалу соответствует первая из накопленных частот, превышающая половину всего объема совокупности.

$$Me = X_{Me(\min)} + \frac{h \left(\frac{n}{2} - H_{i(Me-1)} \right)}{n_{iMe}}.$$

где $X_{Me(\min)}$ – нижняя граница медианного интервала; h – ширина интервала; n_{iMe} – частота медианного интервала; $H_{i(Me-1)}$ – накопленная частота интервала, предшествующего медианному; n – объем выборки.

$$Me = 4078 + \frac{164 \cdot \left(\frac{36}{2} - 14 \right)}{9} = 4150,89.$$

Графическое определение медианы.

Последнюю ординату кумуляты делим пополам. Из полученной точки восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с кумулятой. Абсцисса точки пересечения и дает значение медианы.

Проверка аналитического и графического метода определения медианы

$$Me_{(\text{аналитическая})} \approx Me_{(\text{графическая})}.$$

Определение моды.

Находим модальный интервал, т. е. интервал, содержащий моду, по наибольшей частоте:

$$Mo = X_{Mo(\min)} + \frac{h(n_{iMo} - n_{i(Mo-1)})}{(n_{iMo} - n_{i(Mo-1)}) + (n_{iMo} - n_{i(Mo+1)})},$$

где $X_{Mo(\min)}$ – нижняя граница модального интервала; n_{iMo} – частота модального интервала; $n_{i(Mo-1)}$ – частота интервала, предшествующего модальному; $n_{i(Mo+1)}$ – частота интервала, следующего за модальным.

$$Mo = 4078 + \frac{164 \cdot (9 - 7)}{(9 - 7) + (9 - 6)} = 4143,6.$$

Определение асимметрии и эксцесса.

Вычисления осуществляем по способу «условного нуля», используя вспомогательные коэффициенты ($x_0 = 4\,160$ – середина интервала с максимальной частотой). Полученные результаты заносим в таблицу 8.

Таблица 8 – Определение асимметрии и эксцесса

№	Границы интервалов	Середина интервала x_i	Частота n_i	$x'_i = \frac{x_i - x_0}{h}$	$n_i \cdot x'_i$	$n_i \cdot x'^2_i$	$n_i \cdot x'^3_i$	$n_i \cdot x'^4_i$	$x'_i + 1$	$n_i (x'_i + 1)^4$
1	3750–3914	3 832	7	–2	–14	28	–56	112	–1	7
2	3914–4078	3 996	7	–1	–7	7	–7	7	0	0
3	4078–4242	4 160	9	0	0	0	0	0	1	9
4	4242–4406	4 324	6	1	6	6	6	6	2	96
5	4406–4570	4 488	5	2	10	20	40	80	3	405
6	4570–4734	4 652	2	3	6	18	54	162	4	512
			$\Sigma = 36$		1	79	37	367		1029

Рассчитаем вспомогательные коэффициенты:

$$\gamma_1 = \frac{\Sigma(6)}{\Sigma(4)} \cdot \gamma_1 = \frac{1}{36} = 0,02777778.$$

$$\gamma_2 = \frac{\Sigma(7)}{\Sigma(4)} \cdot \gamma_2 = \frac{79}{36} = 2,194444.$$

$$\gamma_3 = \frac{\Sigma(8)}{\Sigma(4)} \cdot \gamma_3 = \frac{37}{36} = 1,0277778.$$

$$\gamma_4 = \frac{\Sigma(9)}{\Sigma(4)} \cdot \gamma_4 = \frac{367}{36} = 10,194444.$$

$$\gamma_5 = \frac{\Sigma(11)}{\Sigma(4)} \cdot \gamma_5 = \frac{1029}{36} = 28,5833333.$$

Проверка:

$$\gamma_5 = 4\gamma_1 + 6\gamma_2 + 4\gamma_3 + \gamma_4 + 1.$$

$$\gamma_5 = 4 \cdot 0,02777778 + 6 \cdot 2,194444 + 4 \cdot 1,0277778 + 10,194444 + 1 = 28,5833333.$$

Найдем:

$$\gamma_1^2 = (0,02777778)^2 = 0,000771605.$$

$$\gamma_1^3 = (0,02777778)^3 = 2,14335E - 05.$$

$$\gamma_1^4 = (0,02777778)^4 = 5,95374E - 07.$$

$$\mu_1 = \gamma_2 - \gamma_1^2 \cdot \mu_1 = 2,194444 - (0,02777778)^2 = 2,19367284.$$

$$\mu_2 = \gamma_3 - 3\gamma_1\gamma_2 + 2\gamma_1^3.$$

$$\mu_2 = 1,0277778 - 3 \cdot 0,02777778 \cdot 2,194444 + 2 \cdot 0,02777778^3 = 0,84495027.$$

$$\mu_3 = \gamma_4 - 4\gamma_1\gamma_3 + 6\gamma_1^2\gamma_2 - 3\gamma_1^4.$$

$$\mu_3 = 10,194444 - 4 \cdot 0,02777778 \cdot 1,0277778 + 6 \cdot 0,02777778^2 \cdot 2,194444 - 3 \cdot 0,02777778^4 = 10,0904046.$$

Проверка:

$$\gamma_4 = \mu_3 + 4\gamma_1\mu_2 + 6\gamma_1^2\mu_1 + \gamma_1^4.$$

$$\gamma_4 = 10,0904046 + 4 \cdot 0,02777778 \cdot 0,84495027 + 6 \cdot 0,02777778^2 \cdot 2,19367284 + 0,02777778^4 = 10,1944444.$$

$$\bar{X} = x_0 + h\gamma_1. \bar{X} = 4160 + 164 \cdot 0,02777778 = 4164,555556.$$

$$S = h\sqrt{\mu_1}. S = 164\sqrt{2,19367284} = 242,901265.$$

$$A_S = \frac{\mu_2}{\sqrt{\mu_1^3}}. A_S = \frac{0,84495027}{\sqrt{2,19367284^3}} = 0,26005988.$$

$$E_x = \frac{\mu_3}{\mu_1^2} - 3. E_x = \frac{10,0904046}{2,19367284^2} - 3 = 0,90316207.$$

Так как результат для A_S положительный, то, следовательно, асимметрия правосторонняя (математическое ожидание расположено правее моды).

Так как эксцесс отрицательный, то, следовательно, вершина эмпирической кривой распределения лежит выше вершины теоретической кривой.

Выбор теоретического закона распределения (выбор осуществляем по коэффициенту вариации, а также по виду полигона и гистограммы). В нашем случае коэффициент вариации равен 6,61 %, на основании чего выбираем нормальный закон распределения.

Расчет теоретической кривой нормального закона распределения представлен в таблице 9. Значения функции $f(t)$ представлены в столбце 7.

Таблица 9 – Расчет теоретической кривой нормального закона распределения

№	Границы интервалов	Средины интервалов x_i	Частоты n_i	$x_i - \bar{X}$	Нормированное отклонение $\frac{x_i - \bar{X}}{S}$	$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$	Теоретические Частоты $n_i = \frac{hn}{S} f(t)$	
							Вычисл.	Округ.
1	3750–3914	3 832	7	–337,7	–1,39 036 822	0,24 968 738	6,068 944 383	6
2	3914–4078	3 996	7	–173,7	–0,71 519 677	0,35 369 443	8,596 957 745	8
3	4078–4242	4 160	9	–9,722	–0,04 002 532	0,39 899 072	9,695 907 145	9
4	4242–4406	4 324	6	154,28	0,63 514 614	0,35 820 163	8,706 510 423	8
5	4406–4570	4 488	5	318,28	1,31 031 759	0,25 609 155	6,224 605 353	6
6	4570–4734	4 652	2	482,28	1,98 548 904	0,14 577 229	3,543 166 332	3
			$\Sigma = 36$					

Приведенные в таблице 9 данные используются для расчета и построения теоретической кривой нормального закона распределения.

Заключение

Выполнена математическая обработка данных наблюдений за отказами топливных насосов тракторных дизелей Д-245 и Д-243, определены числовые характеристики случайной величины с целью идентификации закона распределения. На основании полученных данных выполнено построение гистограммы, ломаной кумуляты, полигона и ступенчатой кумуляты, а также аналитическое и графическое определения медианы. Получены данные для расчета теоретической кривой нормального закона распределения.

Список использованных источников

1. Щурин, К. В. Планирование эксперимента : практ. рук. / К. В. Щурин, В. И. Кочурко, В. Н. Основин [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. – Барановичи : БарГУ, 2022. – 260 с.
2. Щурин, К. В. Надежность мобильных машин : учебник для вузов / К. В. Щурин, В. Е. Тарасенко. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 400 с.

3. Щурин, К. В. Надежность мобильных машин / К. В. Щурин ; Оренбургский государственный университет. – Оренбург : ОГУ, 2010. – 585 с.
4. Хабардин, В. Н. Практикум по диагностированию автотракторных двигателей : учеб. пособие / В. Н. Хабардин. – Иркутск : Иркутский ГАУ им. А. А. Ежовского, 2019. – 208 с.
5. Петровский, Д. И. Диагностирование топливной системы высокого давления дизелей по амплитудно-фазовым параметрам топливоподачи : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Петровский Дмитрий Иванович ; МГАУ имени В. П. Горячкина. – М. : 2004. – 20 с.
6. Ткаченко, Н. В. Анализ способов восстановления деталей топливной аппаратуры / Н. В. Ткаченко // Наука без границ. – 2018. – № 6(23). – С. 48–52.
7. Катаев, Ю. В. Прогнозирование отказов в двигателях сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий / Ю. В. Катаев, М. Г. Загоруйко, И. А. Тишанинов [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 2. – С. 79–82.
8. Марусин, А. В. Совершенствование диагностирования плунжерных пар ТНВД автотракторных дизелей : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Марусин Александр Вячеславович ; СГТУ имени Ю. А. Гагарина. – Саратов, 2016. – 133 л.