УДК 664.143

Н. С. Голуб, студентка (БГТУ);
М. И. Кулак, доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой (БГТУ)

НАДЕЖНОСТЬ КОНДИТЕРСКОГО УПАКОВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Статья посвящена анализу статистических данных об отказах, зафиксированных в журналах регистрации отказов оборудования на кондитерских предприятиях. Приведена по каждому виду оборудования установленная наработка на отказ. Рассмотрено поведение функции интенсивности отказов для различных видов функций распределения наработки. Представлены параметры распределений, а также фактические и табличные значения критерия Пирсона для каждого цеха и кондитерского оборудования. Рассчитаны параметры среднего времени безотказности работы и средней частоты отказов для кондитерского оборудования и цехов.

The article is devoted to the analysis of statistical data about the failures recorded in the log books of equipment failures on confectionery companies. Shown for each type of equipment installed MTBF. Considered the behavior of the function failure rate for different types of distribution functions work. The parameters of the distributions, as well as the actual and valued Pearson criterion for each shop and confectionery equipment. Calculated parameters the mean time infallibility and the average failure rates for confectionery equipment and workshops.

Введение. В связи с развитием современной техники особую важность приобрели многочисленные вопросы повышения надежности различного рода устройств. Для решения задачи оценки характеристик надежности в первую очередь может быть использована информация, получаемая на этапе реальной эксплуатации оборудования. Негативной стороной эксплуатационных наблюдений является малый объем статистических данных [1]. Ввиду указанных особенностей, возникающих при анализе эксплуатационной информации, перед исследователями встают проблемы достоверного оценивания характеристик надежности. Наиболее полно специфику функционирования оборудования отражает эксплуатационная информация.

Основными источниками статистических данных о дефектах и отказах оборудования являются:

1) журналы дефектов, которые ведутся в соответствии с правилами технической эксплуатации оборудования;

2) акты расследования нарушений в работе оборудования, составляемые по результатам выяснения причин сбоев в работе;

3) паспортные данные оборудования;

4) сведения о плановых ремонтах;

5) статистические данные о наработках оборудования;

6) сведения о выводе оборудования из эксплуатации;

7) ежегодные отчеты и справки о состоянии оборудования, базы данных исследовательских организаций.

В ходе данного исследования были проанализированы статистические данные об отказах оборудования СООО «Первая шоколадная компания» за 2005–2013 гг., зафиксированные в журнале регистрации отказов оборудования.

Проведение эксперимента. Проведенный анализ основных и наиболее часто используемых в теории надежности моделей безотказной работы оборудования показывает, что ни одна из них не описывает все периоды его эксплуатации. Поэтому актуальной является задача построения модели безотказности, описывающей полное эксплуатационное время работы оборудования.

Зафиксированные в журналах данные на первом этапе обработки были введены в электронные таблицы Excel и отсортированы по кондитерским машинам и цехам.

По каждому виду оборудования была установлена наработка на отказ. Это технический параметр, характеризующий надежность оборудования и отражающий продолжительность работы устройства между отказами.

При составлении наработки на отказ учитывалось, что предприятие работает в 2 смены. Во время обработки данных наблюдения подбирались различные интервалы времени. Так, для шаровой мельницы UNICON, упаковщика Линепак в качестве интервала был выбран квартал; для прессового насоса Universal — 3 квартала; для глазировочной линии, цеха производства шоколада, цеха производства конфет — месяц; для упаковщика SIG — период в 5 месяцев; для шоколадной линии и цеха приготовления шоколадной массы — 2 месяца; для дозатора № 2 — время в течение 50 дней.

Математическое моделирование. Для описания поведения систем и их элементов с точки зрения надежности используются параметрические семейства различных функций распределения наработки на отказ, аналитическое описание которых приведено, например, в [2]. При соответствующем выборе параметров модели безотказности на основе описанных распределений функция интенсивности отказов может быть возрастающей, убывающей или постоянной. Так, распределение Эрланга, усеченное нормальное распределение, гамма-распределение, распределение Вейбулла – Гнеденко описывают характеристики элементов систем с возрастающей функцией интенсивности отказов. Экспоненциальное распределение описывает системы с постоянной интенсивностью отказов. Логарифмически нормальное распределение используется для систем с убывающей функцией интенсивности отказов.

В данной работе для построения статистической модели надежности оборудования были рассмотрены следующие варианты распределения времени наработки на отказ: экспоненциальное, Вейбулла – Гнеденко, Эрланга, усеченное нормальное, логарифмически нормальное и нормальное распределения.

Экспоненциальное распределение. Поскольку интенсивность отказов в этом случае постоянна (λ = const), то считается, что экспоненциальное распределение описывает как «стареющие», так и «молодеющие» системы. Очевидно, что описание поведения реальных систем и их элементов на основе экспоненциального распределения является идеализированным. Однако оно широко применяется в теории надежности, поскольку удобно с точки зрения упрощения расчетов показателей надежности для периода нормальной эксплуатации оборудования. Выражение для функции распределения интенсивности отказов

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t). \tag{1}$$

Экспоненциальное распределение является частным случаем некоторых двухпараметрических распределений, к которым относятся распределения Вейбулла – Гнеденко и Эрланга [2].

Распределение Вейбулла – Гнеденко. Данное распределение двухпараметрическое, включающее θ — параметр, определяющий масштаб, и β — параметр асимметрии:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right]. \tag{2}$$

При $\beta > 1$ интенсивность отказов элементов систем с течением времени возрастает, а при $\beta < 1$ уменьшается, что позволяет использовать данную модель для описания поведения систем во время периодов приработки и старения.

Распределение Эрланга. По своей структуре распределение Эрланга является распределением суммы n независимых экспоненциально распределенных случайных величин с параметром α.

Считается, что модель, построенная на распределении Эрланга, является более адекватной для описания поведения систем, чем экспоненциальная модель, и охватывает два периода эксплуатации — период приработки и период нормальной эксплуатации.

Функция распределения имеет вид

$$f(t) = \alpha \frac{(\alpha t)^{n-1}}{(n-1)!} \exp(-\alpha t). \tag{3}$$

Модель на основе усеченного слева нормального распределения. Усеченное нормальное распределение является двухпараметрическим распределением, у которого параметр σ определяет масштаб распределения, а параметр μ — форму распределения.

Практика использования данного распределения показала, что оно позволяет описать поведение систем, у которых отказы наиболее вероятны как в начале, так и в некоторый заданный период эксплуатации.

Функция распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \tag{4}$$

где a — параметр, который определяется по следующей формуле:

$$a = \left[1 - \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1}. \tag{5}$$

Символом Φ в уравнении (5) обозначен интеграл вероятностей, который, в свою очередь, вычисляется с помощью численных методов по формуле

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} \exp(-\frac{u^2}{2}) du. \tag{6}$$

Модель на основе логарифмически нормального распределения.

Функция распределения имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \qquad (7)$$

где μ — математическое ожидание натурального логарифма случайной величины t, обозначающей наработку на отказ.

Распределение (7) является двухпараметрическим, однако параметры формы μ и масштаба σ не имеют достаточно просто интерпретируемой функциональной связи с показателями безотказности.

Нормальное распределение. Данное распределение широко используется при оценке надежности различных систем, на которую воздействует ряд случайных факторов, каждый из которых незначительно влияет на результирующий эффект. Отказы систем носят постепенный характер вследствие старения элементов.

Функция нормального распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right). \qquad (8)$$

Для определения параметров распределений использовались уравнения связи этих параметров с математическим ожиданием времени, обозначаемым t, наработки на отказ μ и дисперсией D.

Аппроксимация данных приведенными выше законами распределения свидетельствует о том, что вероятность отказа подчиняется экспоненциальному закону распределения, распределениям Эрланга и Вейбулла – Гнеденко.

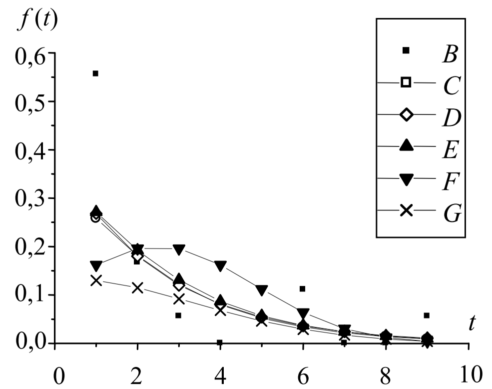
На рис. 1 представлены законы распределения отказов для цехов.

На рис. 2 отражены законы распределения отказов для кондитерского оборудования СООО «Первая шоколадная компания».

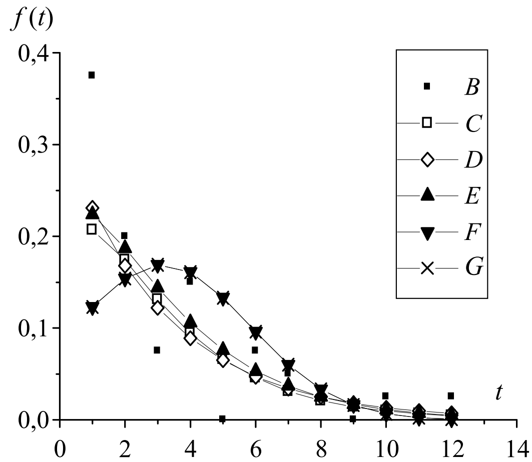
Для проверки гипотезы о соответствии эмпирического распределения предполагаемому теоретическому используется критерий согласия Пирсона χ^2.

В табл. 1 представлены параметры распределений, а также фактические и табличные значения критерия Пирсона для каждого цеха.

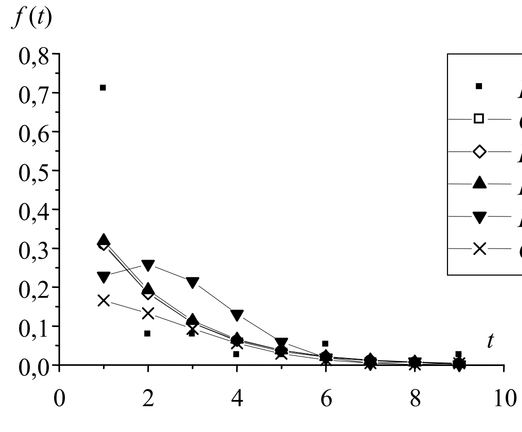
Сопоставляя табличное значение критерия Пирсона χ^2 со значениями, рассчитанными по фактическим данным, видим, что гипотеза верна для экспоненциального распределения, а также распределений Вейбулла – Гнеденко и Эрланга. Вместе с тем параметр формы в распределении Эрланга n и параметр асимметрии в распределении Вейбулла – Гнеденко β получились практически равными единице.



а



б



в

Рис. 1. Законы распределения отказов для цехов: *а* — приготовления шоколадной массы; *б* — производства шоколада; *в* — производства конфет: *B* — экспериментальные данные; *C* — распределение Эрланга; *D* — экспоненциальное распределение; *E* — распределение Вейбулла – Гнеденко; *F* — усеченное нормальное распределение; *G* — нормальное распределение

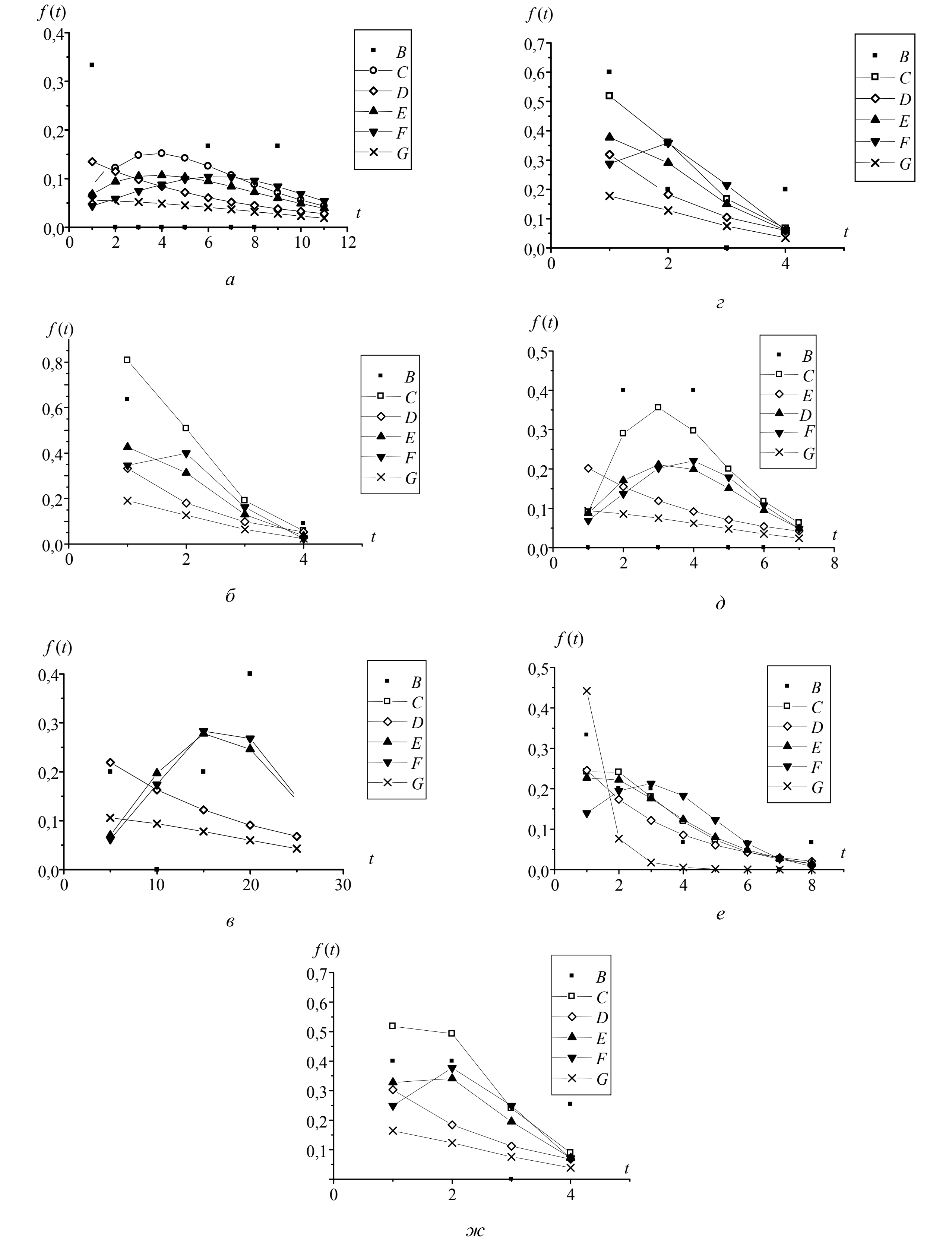


Рис. 2. Законы распределения отказов для кондитерского оборудования:
а — глазировочная линия; *б* — шоколадная линия; *в* — упаковщик SIG; *г* — упаковщик Линепак;
д — дозатор № 2; *е* — шаровая мельница UNICON; *ж* — насос прессовый Universal:
B — экспериментальные данные; *C* — распределение Эрланга;
D — экспоненциальное распределение; *E* — распределение Вейбулла – Гнеденко;
F — усеченное нормальное распределение; *G* — нормальное распределение

В результате оба эти распределения свелись к экспоненциальному закону, который для них является частным случаем. Данное обстоятельство фактически доказывает, что распределение является экспоненциальным.

В табл. 2 представлены параметры распределений, фактические и табличные значения критерия Пирсона для кондитерского оборудования.

В случае кондитерского оборудования, сопоставляя табличное значение критерия Пирсона χ^2 со значениями, рассчитанными по фактическим данным, видим, что гипотеза верна для экспоненциального распределения, а также распределений Вейбулла – Гнеденко и Эрланга.

Однако чаще всего используется закон экспоненциального распределения, при этом он является наиболее простым и удобным.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ — вероятность того, что в заданном интервале времени t в системе или элементе не возникнет отказ, т. е. $P(t) = P(T_0 > t)$, где T_0 — случайное время безотказной работы изделия (время до отказа).

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right). \tag{9}$$

Среднее время до отказа (среднее время безотказной работы) представляет математическое ожидание наработки до первого отказа. Таким образом,

$$T_0 = \int_0^\infty P(t)dt. \tag{10}$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы имеем

$$T_0 = \int_0^\infty e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda}. \tag{11}$$

Параметр потока отказов (средняя частота отказов) $\omega(t)$ — математическое ожидание числа отказов, происшедших за единицу времени, начиная с момента t.

Таблица 1

Параметры законов распределения, значения критерия Пирсона по цехам

Наименование цеха	Распределение, параметры	Значение параметров	Критерий Пирсона χ^2	Дисперсия	Табличное значение $\chi^2_{\alpha\nu}$
Цех приготовления шоколадной массы	Экспоненциальное: – λ	0,400	13,963	0,004	14,067
Цех производства шоколада	Экспоненциальное: – λ	0,317	13,116	0,003	18,307
Цех производства конфет	Вейбулла – Гнеденко: – β – θ	1,050 1,932	12,039 –	0,015 –	12,592 –

Таблица 2

Параметры законов распределения, значения критерия Пирсона для кондитерского оборудования

Наименование оборудования	Распределение, параметры	Значение параметров	Критерий Пирсона χ^2	Дисперсия	Табличное значение $\chi^2_{\alpha\nu}$
Глазировочная линия	Экспоненциальное: – λ	0,158	15,716	0,013	16,919
Шоколадная линия	Экспоненциальное: – λ	0,611	3,382	0,024	5,991
Упаковщик SIG	Экспоненциальное: – λ	0,294	7,648	0,029	7,815
Упаковщик Линепак	Экспоненциальное: – λ	0,611	3,382	0,024	5,991
Дозатор № 2	Вейбулла – Гнеденко: – β – θ	2,190 4,291	7,583 –	0,029 –	9,488 –
Шаровая мельница UNICON	Экспоненциальное: – λ	0,349	3,420	0,002	12,592
Прессовый насос Universal	Экспоненциальное: – λ	0,500	3,275	0,021	5,992

Таблица 3

Параметры среднего времени безотказности работы, средней частоты отказов для кондитерского оборудования и цехов

Вид оборудования, наименование цеха	Единицы интервала времени T	Интенсивность отказов λ, в единицах $1 / T_0$	Среднее время безотказной работы T_0, в единицах интервала времени	Среднее время безотказной работы в месяцах	Средняя частота отказов $\omega(t)$
Цех приготовления шоколадной массы	2 месяца	0,400	2,500	5,000	0,400
Цех производства шоколада	1 месяц	0,317	3,155	3,155	0,317
Цех производства конфет	1 месяц	0,528	1,895	1,894	0,528
Глазировочная линия	1 месяц	0,158	6,329	6,329	0,158
Шоколадная линия	2 месяца	0,611	1,636	3,272	0,611
Упаковщик SIG	5 месяцев	0,294	3,401	17,005	0,294
Упаковщик Линепак	1 квартал	0,556	1,799	5,397	0,556
Дозатор № 2	50 дней	0,263	3,800	6,337	0,263
Шаровая мельница UNICON	1 квартал	0,349	2,865	8,595	0,349
Насос прессовый Universal	3 квартала	0,500	2,000	18,000	0,500

Этот показатель является характеристикой только восстанавливаемого оборудования. Величина $1 / \omega$ представляет собой среднюю наработку на отказ.

В общем случае для определения ω существует интегральное уравнение Вольтерра второго рода с разностным ядром [3]. Обычно оно решается численными методами. Асимптотическое решение уравнения имеет вид

$$\lim_{t \to \infty} \omega(t) = \frac{1}{T_0}. \qquad (12)$$

Предел, к которому стремится средняя частота отказов при $t \to \infty$, равен величине, обратной среднему времени безотказной работы.

Рассмотрим экспоненциальный закон времени безотказной работы, для которого

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

где $\lambda = \text{const}$.

Проведя необходимые преобразования, получим

$$\omega(t) = \lambda = \frac{1}{T_0}. \qquad (13)$$

В табл. 3 представлены параметры среднего времени безотказности работы и средней частоты отказов для кондитерского оборудования и цехов.

Для цеха производства конфет и дозатора № 2 не подходит экспоненциальный закон распределения. Для распределения Вейбулла – Гнеденко среднее время безотказной работы было вычислено по формуле (10). В связи с тем что различия в расчетах T_0 по формуле (10) и формуле (11) составляют одну сотую, то для интенсивности отказов у цеха производства конфет и дозатора № 2 можно принять экспоненциальный закон распределения.

Вывод. Распределения отказов для цехов и кондитерского оборудования свелись к экспоненциальному закону, который для распределений Вейбулла – Гнеденко и Эрланга является частным случаем. Также видно, что интенсивность отказов и параметры средней частоты отказов для кондитерского оборудования и цехов изменяются в широких пределах.

С учетом того что уровень надежности оборудования оказывает непосредственное влияние на эффективность производства, работа должна быть продолжена. Безотказная работа кондитерских машин и цехов позволяет своевременно и качественно осуществлять необходимые функции. Результаты данных исследований также могут быть использованы при решении задач оперативного и стратегического управления.

Литература

1. Антонов А. В. Системный анализ. М.: Высш. шк., 2006. 454 с.

2. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.

3. Бобров В. И. Надежность технических систем. М.: МГУП, 2004. 236 с.

Поступила 28.09.2014