

УДК 621.833.031:351.861

А.Г. Приймаков<sup>1</sup>, Р.Н. Джус<sup>2</sup>, В.А. Гузенко<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ СЛУЧАЙНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И ВНЕЗАПНЫХ ОТКАЗАХ НА ПРИМЕРЕ ФИЛЬТРОВАНИЯ ГИДРОЖИДКОСТЕЙ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены понятия о прогнозировании надежности объектов при случайном воздействии и внезапных отказах в высоконагруженных конструкциях агрегатов авиационной техники.

**Ключевые слова:** надежность объекта, случайное воздействие, внезапный отказ, вероятность отказа.

### Введение

**Постановка проблемы.** В высоконагруженных агрегатах авиационной техники могут возникать внезапные отказы в результате недопустимо больших значений перемещений, скоростей, ускорений, напряжений, деформаций и других характерных параметров в определенных точках конструкции. В этом случае отказ можно трактовать как выброс векторов параметров  $z(t)$ , характеризующих работоспособность объекта, из данной области  $\Omega$ .

**Анализ последних достижений и публикаций.** Для решения задачи прогнозирования надежности в такой постановке эффективно можно использовать математический аппарат теории выбросов случайных функций [1-4].

**Цель работы.** Задача исследования – разработать подход для определения вероятности безотказной работы высоконагруженных агрегатов авиационной техники.

### Изложение материалов исследований

Рассмотрен случай, когда вектор параметров  $z(t)$ , характеризующих работоспособность объекта, состоит из одной компоненты, которая представляет непрерывный и дифференцируемый случайный процесс с заданной совместной плотностью вероятности  $f(z, \dot{z}, t)$  процесса  $z(t)$  и его производной  $\dot{z}(t)$ . Область работоспособных состояний  $\Omega$  задается неравенством

$$\Omega : z(t) < \Gamma, \quad (1)$$

где  $\Gamma$  – некоторая детерминированная величина.

Пересечения процессом  $z(t)$  уровня  $\Gamma$  с положительной производной называются положительными, а с отрицательной – отрицательными. Поскольку процесс  $z(t)$  является случайным, число положительных  $v(t)$  и отрицательных  $\bar{v}(t)$  пересечений на определенном отрезке времени  $[0, T]$  будет дискретной случайной величиной.

Обозначим  $N(t)$  – среднее число положительных пересечений;  $\bar{N}(t)$  – среднее число отрицательных пересечений за время  $[0, T]$ .

Для математического ожидания дискретной случайной величины

$$M[v(t)] = N(t) = \sum_{k=1}^{\infty} k P_k(t), \quad (2)$$

где  $k$  – набор всевозможных значений случайной величины  $v(t)$ ;  $P_k$  – вероятность того, что на промежутке времени  $[0, T]$  произойдет  $k$  положительных выбросов.

Выразим среднее число положительных выбросов  $N(t)$  через заданную плотность вероятности  $f(z, \dot{z}, t)$ . Для этого рассмотрим малый промежуток времени  $[t, t + dt]$  и определим среднее число положительных выбросов  $N(dt)$  на этом интервале. Воспользуемся соотношением (2), в котором заменим  $t$  на  $dt$  и предположим  $dt$  настолько малым, что вероятности двух и более выбросов на интервале  $[t, t + dt]$  равны нулю:

$$P_k(dt) = 0, (k=2, 3 \dots) \text{ и } N(dt) = P_1(dt). \quad (3)$$

Вероятность одного положительного выброса  $P_1(dt)$  в соответствии с рис. 1 можно представить как вероятность случайного события:

$$P_1(dt) = \left[ \begin{array}{c} \Gamma - \Delta z_1 < z(t) < \Gamma + \Delta z_2 \\ \bullet \\ z(t) > 0 \end{array} \right]. \quad (4)$$

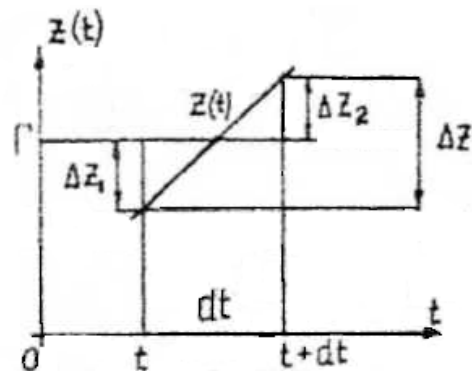


Рис. 1. Вероятность случайного события

Воспользуемся свойствами плотности  $f(z, \dot{z}, t)$  для определения вероятности случайного события (4):

$$P_1(dt) = f(z, \dot{z}, t) dz \, d\dot{z}. \quad (5)$$

Поскольку интервал интегрирования по переменной  $z$  является малым, можно воспользоваться теоремой о среднем, согласно которой:

$$\int_{\Gamma-\Delta z_1}^{\Gamma+\Delta z_2} f(z, \dot{z}, t) dz \approx f(z = \Gamma, \dot{z}, t) (\Gamma + \Delta z_2 - \Gamma + \Delta z_1) = f(z = \Gamma, \dot{z}, t) (\Delta z_1 + \Delta z_2) \quad [4].$$

Сумму в полученном выражении можно представить  $\Delta z_1 + \Delta z_2 = \Delta z = \dot{z} dt$ , тогда окончательно формула (3) примет вид

$$N(t) = P_1(dt) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(z = \Gamma, \dot{z}, t) \dot{z} dt dz \quad (6)$$

Поскольку число пересечений  $v(t)$  обладает свойством аддитивности,

$$N(t) = \int_0^t N(dt). \quad (7)$$

Подставляя в формулу (7) выражение  $N(dt)$ , найденное из (6), окончательно получим среднее число положительных пересечений за время  $[0, t]$ :

$$N(t) = \int_0^t \int_0^{\infty} f(z = \Gamma, \dot{z}, t) \dot{z} dt dz. \quad (8)$$

Для стационарного случайного процесса  $f(z, \dot{z}, t)$  не зависит от времени, и формула (8) примет вид

$$N(t) = t \cdot \int_0^{\infty} f(z = \Gamma, \dot{z}) \dot{z} d\dot{z}. \quad (9)$$

Аналогично выводятся формулы для среднего числа отрицательных пересечений

$$\bar{N}(t) = \int_0^t \int_0^{\infty} f(z = \Gamma, \dot{z}, t) |\dot{z}| dz. \quad (10)$$

В случае, когда  $z(t)$  представляет нормальный стационарный случайный процесс, тогда

$$f(z, \dot{z}, t) = f_1(z) f_2(\dot{z}), \quad (11)$$

где  $f_1(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_z}} \exp\left[-\frac{(z - m_z)^2}{2D_z}\right]$ ,

$$f_2(\dot{z}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{\dot{z}}}} \exp\left[-\frac{(\dot{z})^2}{2D_{\dot{z}}}\right],$$

$m_z$  – математическое ожидание  $z(t)$ ;  $D_z, D_{\dot{z}}$  – дисперсии процессов  $z(t)$  и  $\dot{z}(t)$ . Подставляя (11) в (9), получим

$$N(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{D_{\dot{z}}}{D_z}} \exp\left[-\frac{(\Gamma - m_z)^2}{2D_z}\right]. \quad (12)$$

Если ввести понятие эффективности частоты  $\omega_e = \sqrt{D_{\dot{z}}/D_z}$ , то формула (12) примет вид

$$N(t) = \frac{t\omega_e}{2\pi} \exp\left[-\frac{(\Gamma - m_z)^2}{2D_z}\right]. \quad (13)$$

При  $\Gamma = m_z$  среднее число положительных выбросов будет  $N(t) = t\omega_e/(2\pi)$ . Решая это уравнение относительно  $\omega_e$ , получим:

$$\omega_e = 2\pi[N(t)/t]. \quad (14)$$

Отсюда следует, что эффективная частота  $\omega_e$  может рассматриваться как средняя частота положительных пересечений уровня  $m_z$  в единицу времени. Из соотношения (10) аналогично получаем формулу для среднего числа отрицательных пересечений, когда  $z(t)$  является отрицательным случайным процессом:

$$\bar{N}(t) = \frac{t\omega_e}{2\pi} \exp\left[-\frac{(\Gamma - m_z)^2}{2D_z}\right]. \quad (15)$$

**Определение вероятности безотказной работы высоконадежных объектов.** Рассмотрим несколько случаев определения вероятности безотказной работы высоконадежных объектов.

1-й случай  $\Omega: z(t) < \Gamma$ . Вероятность безотказной работы определится как вероятность случайного события, заключающегося в том, что в течение промежутка времени  $[0, t]$  не произойдет ни одного положительного выброса процесса  $z(t)$  уровня  $\Gamma$ :

$$P(t) = P[z(\tau) < \Gamma; 0 < \tau < t]. \quad (16)$$

Точное решение поставленной задачи представляет большие математические трудности даже в простейших случаях, поэтому ограничимся приближенным решением. Предположим, что  $P(0)=1$ , и вычислим вначале вероятность отказа:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (17)$$

Для этого введем случайные события  $A_k$ , представляющие отказ объекта в результате  $k$  положительных выбросов. Сумма этих событий  $A = \sum A_k$  представляет отказ объекта. Тогда вероятность отказа в предположении несовместимости событий  $A_k$  можно определить на основе теоремы вероятностей следующим образом:

$$Q(t) = P(A) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k. \quad (18)$$

Тогда  $Q(t) = A = \sum P_k(t)$ .

Большинство агрегатов авиационной техники можно отнести к высоконадежным объектам, для которых вероятность двух и более положительных выбросов близка к нулю, т.е.

$$P_k(t) \approx 0, k = 2, 3, \dots \quad (19)$$

Учитывая соотношение (19), получаем приближенные выражения для вероятности отказа и безотказной работы высоконадежных объектов:

$$Q(t) \approx N(t), P(t) \approx 1 - N(t). \quad (20)$$

2-й случай  $\Omega: z < z(t) < \Gamma$ . Обобщим полученные формулы в случае, если область работоспособных состояний  $\Omega$  представляет полосу, ограниченную двумя горизонтальными прямыми  $z = z$  и  $z = \Gamma$ . Тогда вероятность безотказной работы определится как вероятность случайного события, заключающегося в том, что в течение промежутка времени  $[0, t]$  не произойдет ни одного положительного выброса  $z(t)$  через уровень  $z$  при условии  $z < z(0) < \Gamma$ :

$$P(t) = P[\tau < z(t) < \Gamma]; 0 < \tau < t. \quad (21)$$

Используя соотношение (17) между  $Q(t)$  и  $P(t)$ , предполагая высокую надежность объекта, где  $P(A) \approx N(t)$ ,  $P(B) \approx \bar{N}(z, t)$ , можно приблизительно определить вероятность безотказной работы согласно (20):

$$P(t) \approx 1 - N(t) - \bar{N}(z, t). \quad (22)$$

Практическим примером прогнозирования надежности объектов современных летательных аппаратов служит оценка надежности указанных объектов при обводнении их гидросистем.

Наличие воды в стандартном топливе, которое содержит смолянистые соединения, даже в пределах ГОСТ 17216-71, сильно влияет на эффективность его фильтрации, поскольку за счет адсорбционной способности капелек воды на их поверхности содержатся органические загрязнители, которые, достигнув больших размеров, способны забивать поры фильтрующего материала [5].

Как свидетельствует большой опыт эксплуатации самолетов Л-39, данный тип авиационной техники (АТ) имеет существенный конструктивно-производственный недостаток, связанный с неисправностями агрегатов гидросистемы (ГС) из-за коррозионных поражений их деталей, что, в свою очередь, приводят к отказам.

В данное время известен ряд способов отделения от нефтепродуктов свободной воды, которые основываются на химических, физических и физико-химических процессах: разделение водомасляной эмульсии методом отстаивания; отделение воды методом центрифугирования; разделение эмульсий в электрическом поле; обезвоживание нефтепродуктов пористыми материалами.

Наиболее широкое распространение при обезвоживании нефтепродуктов получили методы, которые основываются на применении пористых материалов (методы фильтрации).

Различают гидрофильные и гидрофобные пористые перегородки. Отделение свободной воды в пористых перегородках, которые имеют гидрофильные свойства (вискоза, хлопок и др.), происходит за счет впитывания фильтрующим материалом влаги до полного его насыщения. Перегородки, изготовленные из гидрофобных материалов (капрон, хлорин и др.), проницаемы для нефтепродуктов, но не пропускают капель воды, которые в них содержатся [5].

Для фильтрования гидрожидкостей (ГЖ) и сепарации из них воды самыми перспективными могли бы оказаться объемные пористые материалы, которые изготавливаются на основе металлов, керамики, полимеров и других материалов. В процессе водоотделения важную роль сыграет взаимодействие воды с материалом основы фильтровального элемента. Такое взаимодействие должно определяться как поверхностными свойствами материала основы (значением величины поверхностной энергии на границе

раздела двух сред и краевым углом смачивания), так и поровой структурой материала, которые могут сыграть важную роль в процессе водоотделения [6].

В исследованиях новых перспективных пористых материалов было достигнуто значительные успехи. Для получения данных о структуре таких материалов в предельно широком интервале значений пористости разработана графическая компьютерная модель с воспроизведением всех особенностей структурного состояния пористого материала и его поровой структуры [7].

Для установления адекватности модели проведено сопоставление поровых структур, полученных графическим компьютерным моделированием, с реальными поровыми структурами. Для примера сравнивались такие структуры материала с пористостью 74% (рис. 2) и результаты их порядкового сканирования (рис. 3).

Сопоставление структур и результатов порядкового сканирования показало, что модельная поровая структура не только качественно, но и количественно отражает свойства реальной структуры.

Методом графического компьютерного моделирования были получены поровые структуры материалов, сформированные твердым порообразователем, состоящим из частиц одного размера (30 мкм) кубической формы.

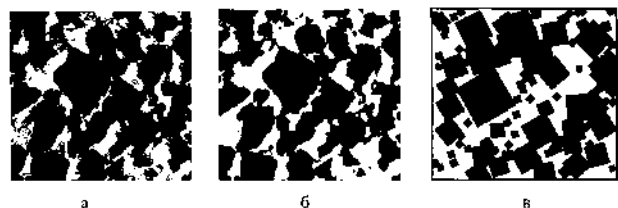


Рис. 2. Поровые структуры материала с пористостью 74%: а – реальная (увеличение  $\times 3365$ ); б – реальная монохромная; в – модельная

Исследование было проведено в диапазоне пористости частиц от 1% вплоть до значений, близких к 100%. Использовались разные формы прямоугольного поля моделирования, которые характеризуются коэффициентом формы  $k$ . Значения  $k$  могли варьироваться в интервале значений от 0,1 до 10.

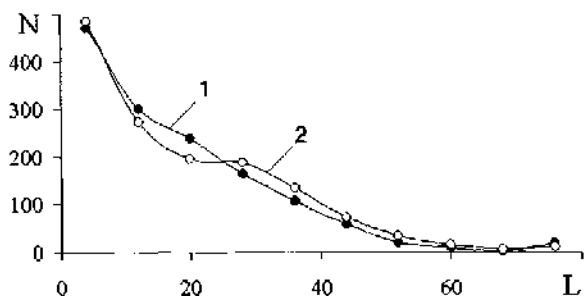


Рис. 3. Результаты порядкового сканирования поровых структур: 1 – реальной; 2 – модельной

Для "объемного материала" ( $k = 1$ ) была получена зависимость  $R$  от общей пористости  $\Pi$  в широком диапазоне ее значений с шагом изменения пористости 1% (рис. 4). Для каждого значения пористости были получены значения проточности путем усреднения данных при 2-кратном повторении машинного эксперимента. Видно, что в интервале пористости от 0 до 55% проточность слабо нарастает. Основное нарастание проточности имеет место в интервале  $\Pi$  от 55% до 65%. Для выяснения степени изотропности изучалась проточность поровой структуры при ее заполнении от верхней грани (рис. 5, а) и от боковой грани (рис. 5, б) [6,7].

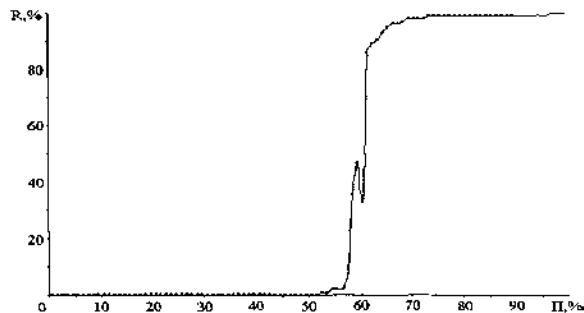


Рис. 4. Зависимость проточности поровой структуры  $R$  от ее пористости  $\Pi$

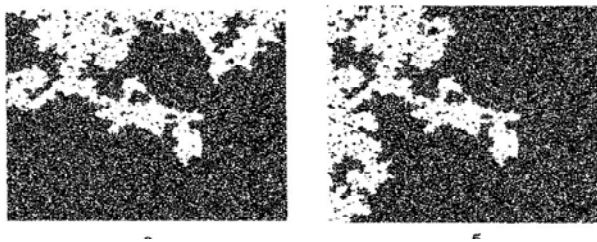


Рис. 5. Поровая структура материала с  $\Pi = 58\%$  и ее проточность (область, выделенная белыми цветами): а — проточность от верхней грани; б — проточность от боковой грани

Характеры поровой структуры и областей проточности не изменялись.

Определена оптимальная пористость, которая обеспечивает оптимальную поровую структуру материала при заданном дисперсном составе порообразователя. Методом графического компьютерного моделирования установлены оптимальные пористости четырех пористых материалов, образованных порообразователями с дисперсными составами, которые резко отличаются, а исследование их механических свойств подтвердило, что их параметры являются оптимальными, и метод нахождения этих значений пористости может быть использован для пористых материалов, которые готовят с использованием порообразователей других дисперсных составов [5].

Проанализированные в [6, 7] результаты и сопоставления физико-химических свойств пористых материалов на разной основе показали, что наименьшую поверхностную энергию, которая опреде-

ляет смачиваемость и адгезионную способность материала, имеет фторопласт-4. Вместе с тем, фторопласт-4, благодаря высокой пластичности, разрешает формировать контролируемую поровую структуру, параметры которой могут варьироваться в широких границах. Установлена высокая эффективность водоотделения ( $\eta = 98 \dots 100\%$ ) объемными пористыми фторопластовыми материалами [6].

## Выводы

1. Рассмотрены понятия о прогнозировании надежности объектов при случайном воздействии и внезапных отказах в высоконагруженных агрегатах авиационной техники.

2. Представлены два случая определения вероятности безотказной работы высоконадежных объектов и выведена формула, позволяющая определить вероятность безотказной работы.

3. В качестве практического примера прогнозирования надежности объектов современных летательных аппаратов проведена оценка надежности указанных объектов при обводнении их гидросистем.

4. Среди методов обезвоживания ГЖ наиболее эффективным и наименее энергоемким определен метод фильтрации. В связи с этим, проблему отказов гидросистем самолетов, вызванных обводнением ГЖ, можно решить путем поиска новых перспективных сепарирующих материалов неволоконного строения, изучение их свойств и разработки на их основе эффективного сепаратора ГЖ.

## Список литературы

1. Приймаков А.Г. Теория износостойкости и ее применение в машиностроении / А.Г. Приймаков, Ю.А. Градыский. — Х.: Обериг, 2009. — 235 с.
2. Приймаков О.Г. Витриальність зварних коняструкцій у будівельній справі / О.Г. Приймаков, А.С. Коваленко. — Х.: Науковий вісник будівництва №45, 2008. — 241 с.
3. Приймаков А.Г. Выносимость конструкционных материалов при абразивном изнашивании / А.Г. Приймаков, Ю.А. Градыский. — Х.: «Обериг», 2009. — 253 с.
4. Жовдак В.А. Прогнозирование ресурса, прочности и надежности элементов машиностроительных конструкций / В.А. Жовдак. — К.: УМК ВО, 1989. — 95 с.
5. Стадніченко М.Г. Вибір способу усунення відмов гідростем літаків, що виникають внаслідок обводнення гідрорідини / М.Г. Стадніченко, Р.М. Джус // Системи озброєння і військової техніки. — 2007. — №1(9). — С. 26-29.
6. Калюжний А.Б. Сепарация воды из дизельных топлив полимерным фильтрующим материалом ФЭП / А.Б. Калюжний, В.Я. Платков, Б.Г. Калюжний // Вестник НТУУ "КПІ". — 1999. — Т. 2, № 36. — С. 549-553.
7. Kalyuzhny A.B. Structure of porous materials and their permeability: determination by computer-aided simulation / A.B. Kalyuzhny, V.Ya. Platkov // Functional Materials. — 2001. — Vol. 8, №1. — P. 90-93.

Поступила в редакцию 26.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.А. Абрамов, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков.

**ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ВИПАДКОВОМУ ВПЛИВІ І РАПТОВИХ ВІДМОВАХ**

О.Г. Приймаков, Р.М. Джус, В.А. Гузенко

*Розглянуто поняття про прогнозування надійності об'єктів при випадковому впливі й раптових відмовах у високонавантажених конструкціях агрегатів авіаційної техніки.*

**Ключові слова:** надійність об'єкта, випадковий вплив, раптова відмова, імовірність відмови.

**PROGNOSTICATION OF RELIABILITY OF OBJECTS AT CASUAL INFLUENCE AND SUDDEN REFUSES**

A.G. Priymakov, R.N. Dzhus, V.A. Guzenko

*Concepts are considered about prognostication of reliability of objects at casual influence and sudden refuses in the high-rate constructions of aggregates of aviation techniques.*

**Keywords:** reliability of object, casual influence, sudden refuse, probability of refuse.