

УДК 614.8

А.В. Прусский¹, В.Д. Калугин², А.Ю. Войтов³¹Институт государственного управления в сфере гражданской защиты, Киев²Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков³Научно-производственное предприятие «Газтехника», Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОВОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ДАТЧИКОМ СПИРАЛЕВИДНОГО ТИПА

Получены математические модели работы газового пожарного извещателя (ГПИ) с полупроводниковым датчиком (ППД) спиралевидного типа (СТ). Модели позволяют без дополнительных экспериментальных исследований получать значения технологических и рабочих параметров, а также технических характеристик разработанного авторами газового пожарного извещателя.

Ключевые слова: пожар, пожарные извещатели, твердые горючие материалы, термическое разложение (тление), газовый пожарный извещатель, полупроводниковый датчик, ток нагревателя, количество витков нагревательного элемента, концентрация оксида титана, критерий Кохрена, критерий Стьюдента, критерий Фишера, математические модели, минимальное время срабатывания.

Введение

Постановка проблемы. Исследования динамики выделения продуктов горения при пожаре показывают, что использование дымовых, тепловых и пожарных извещателей пламени для раннего выявления начальной стадии возгорания твердых горючих материалов (ТГМ) (термическое разложение (тление)) по газообразным продуктам является совершенно неэффективным [1 – 4]. Поэтому в настоящее время актуальной проблемой является разработка газовых пожарных извещателей с высокочувствительными датчиками для обнаружения первичных газообразных продуктов термической деструкции горючих материалов, выделение которых предшествует развитию пожара.

Анализ последних исследований и публикаций. В последние годы интенсивно развиваются исследования в области выявления процесса возгорания ТГМ на стадии его зарождения (по газообразным продуктам), в частности, по созданию сверхчувствительных датчиков первичной информации систем пожарной сигнализации – газовых пожарных извещателей. При этом обосновывается перспектива и актуальность этих исследований и разработок [3, 5 – 7].

Однако в работах [3, 5–7] не приводятся результаты исследований на стадии разработок конструкций и оптимизации рабочего режима и конструктивных параметров газовых пожарных извещателей с полупроводниковыми датчиками, по установлению влияния технологических и рабочих параметров на основные технические характеристики последнего, что значительно повышает эффективность использования пожарного извещателя данного типа при обнаружении пожаров.

Формулирование цели статьи. Целью данной работы является построение математической модели газового пожарного извещателя с полупроводниковым датчиком спиралевидного типа, позволяющей минимизировать экспериментальные исследования и провести целенаправленный выбор необходимых рабочих характеристик ГПИ.

Изложение основного материала

Для построения модели необходимо выбрать рабочие параметры, которые оказывают влияние на характеристики ГПИ с ППД СТ. Главными оказываются три эксплуатационных фактора: 1) концентрация диоксида титана (TiO_2) в чувствительной массе (ЧМ) ППД СТ; 2) количество витков (длина спирали) нагревателя полупроводникового чувствительного элемента (ППЧЭ) СТ; 3) ток нагревателя ППД СТ.

Предварительные экспериментальные исследования показали, что при концентрации TiO_2 в ЧМ ППД СТ меньше 3% (мас.) аналитический сигнал последнего снижается. При концентрации оксида больше 3% (мас.) аналитический сигнал возрастает и стабилизируется, однако при концентрации выше 7% (мас.) его рост оказывается практически незначительным. Таким образом, диапазон оптимальных концентраций TiO_2 принимаем 3–7% (мас.).

Ситуация с количеством витков нагревателя (V) следующая. При $V < 5$ ток нагревателя возрастает выше величины тока адсорбции-десорбции. При $V > 10$ происходит очень медленный нагрев чувствительной массы до температуры, при которой активно протекает процесс адсорбции-десорбции. Поэтому интервал количества витков выбран в пределах 5–10.

Для обеспечения наиболее эффективной работы ППД СТ к нему необходимо подвести ток – для нагрева спирали и, соответственно, ЧМ. При этом ток нагревателя может изменяться в пределах от 0 до 80 мА, что обусловлено особенностями выбранной нити нихрома. Установлено, что при токах ниже 20–25 мА аналитический сигнал датчика очень мал и не отображает реальной картины изменения состава газовой среды в помещении. Экспериментально установлено, что минимальный ток нагревателя целесообразно принять на уровне 30 мА. Что касается верхнего предела, то эксперименты показали, что при токах выше 55 мА в массе чувствительного элемента появляются внутренние напряжения, которые приводят к постепенному «вымыванию» (разрушению) чувствительной массы датчика, что приводит, в итоге, к изменению технических характеристик ППД СТ. Таким образом, максимальное значение тока нагревателя принимаем равным 50 мА, и в этих условиях диапазон значений тока нагревателя датчика составляет 30–50 мА.

Исследования влияния трех факторов – тока нагревателя, количества витков нагревательного элемента, а также концентрации оксида TiO₂ в ЧМ ППД СТ проведены путём постановки эксперимента типа 2³ [8]. Для построения полинома второго порядка применили метод, предложенный Г.Э.П. Бок-

сом и К.Б. Вильсоном [9], согласно которому использовали ортогональные планы первого порядка в качестве ядра, на котором потом достраивали конструкцию плана второго порядка. Авторами использовались ротатбельные планы второго порядка, так как они, в отличие от ортогональных, позволяют предусмотреть значение функции отклика с дисперсией, одинаковой на равных расстояниях от центра плана [10].

Для этого дополнительно проводили эксперименты в центре плана (на нулевом уровне) и на расстоянии d от центра. Звездное плечо d выбирали из условия инвариантности плана к обращению. В условиях проведения трехфакторного эксперимента для построения центрального композиционного ротатбельного плана брали 6 звездных точек, расположенных на расстоянии ± d от центра, и 6 точек, расположенных в центре плана (на нулевом уровне). Величина плеча d для звездных точек равняется 1.682.

Матрица трехфакторного эксперимента по определению зависимости аналитического сигнала и времени насыщения ГПИ с ППД СТ от тока нагревателя, количества витков нагревателя и концентрации оксида титана TiO₂ приведена в табл. 1. Ротатбельный план второго порядка представлен в табл. 2.

Таблица 1

Кодирование данных

Интервал варьирования и уровень факторов	Ток нагревателя (I _{нагр}), мА	Количество витков нагревателя (V)	Концентрация TiO ₂ , % (мас.)
Нулевой уровень, x _i = 0	40	7.5	5
Интервал изменения, δ _i	10	2.5	2
Верхний уровень, x _i = + 1	50	10	7
Нижний уровень, x _i = - 1	30	5	3
Звездные точки:			
X _i = + 1.682	51.682	11.682	8.682
X _i = - 1.682	28.318	3.318	1.318
Кодовое обозначение	X ₁	X ₂	X ₃

Расчет коэффициентов регрессии по результатам экспериментов проводится по следующим формулам [10]:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n y_u}{n} - \frac{\sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^k x_{iu} \cdot \delta_{iu}}{n \cdot \delta_{iu}} \quad (1)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2} \quad (2)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot x_{ju}^2} \quad (3)$$

$$b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^4} + \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^4} \cdot \sum_{u=1}^n \delta_{iu} \quad (4)$$

Значения δ, которые входят в формулы (1) – (4), заимствованы из [10]:

$$\delta_1 = 0.166, \delta_2 = 0.057, \delta_3 = 0.073, \delta_4 = 0.125, \\ \delta_5 = 0.063, \delta_6 = 0.007, \delta_7 = 0.057.$$

Из расчета получили модели следующего вида:

$$Y_U = -0.296 \cdot x_1^2 - 1.496 \cdot x_2^2 - 1.352 \cdot x_3^2 + 25.5 \cdot x_1 + \\ + 28.71 \cdot x_2 + 16.268 \cdot x_3 - 0.107 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.035 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ + 0.133 \cdot x_2 \cdot x_3 - 549.98, \quad (5)$$

$$Y_T = 0.488 \cdot x_1^2 + 3.072 \cdot x_2^2 + 2.518 \cdot x_3^2 - 41.363 \cdot x_1 - \\ - 49.874 \cdot x_2 - 19.175 \cdot x_3 + 0.129 \cdot x_1 \cdot x_2 - \\ - 0.087 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.137 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1361.3. \quad (6)$$

Таблица 2

Центральный композиционный ротатбельный план второго порядка для трех факторов

Опыт	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	Y _U	Y _T
Планирование типа 2 ³	-	-	-	+	+	+	+	+	+	71	363
	+	-	-	-	-	+	+	+	+	90	325
	-	+	-	-	+	-	+	+	+	87	376
	+	+	-	+	-	-	+	+	+	105	338
	-	-	+	+	-	-	+	+	+	82	381
	+	-	+	-	+	-	+	+	+	98	342
	-	+	+	-	-	+	+	+	+	103	392
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	114	351
Звездные точки	-1.682	0	0	0	0	0	2.828	0	0	107	317
	+1.682	0	0	0	0	0	2.828	0	0	130	288
	0	-1.682	0	0	0	0	0	2.828	0	118	306
	0	+1.682	0	0	0	0	0	2.828	0	138	295
	0	0	-1.682	0	0	0	0	0	2.828	123	297
	0	0	+1.682	0	0	0	0	0	2.828	137	286
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	279
Нулевые точки	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	279
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	280
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	280
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	278
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	278
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	278
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	279

Примечание: Y_U – отклик аналитического сигнала насыщения ГПИ с ППД СТ (мВ); Y_T – отклик времени насыщения ГПИ с ППД СТ (с).

Таким образом, получили модели для аналитического сигнала насыщения (5) и времени насыщения (6) ГПИ с ППД СТ от тока (x₁), количества витков нагревателя (x₂) и концентрации оксида титана (x₃).

Получив полиномиальную модель, проводим статистическую оценку её. Проверяем воспроизводимость процесса по критерию Кохрена по формуле:

$$G = \frac{s_{\text{umax}}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G_{(0.05; f_n; f_u)}, \quad (7)$$

где $s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{\text{up}} - \bar{y}_u)^2}{m-1}$ – дисперсия, характеризующая

рассеяние результатов опытов на u-м сочетании уровней факторов; y_{up} – расчетное значение отклика в u-м опыте; p = 1, 2, ..., m – число параллельных опытов; s²_{umax} – наибольшая из дисперсий в строчках плана; G_(0.05; f_n; f_u) – табличное значение критерия Кохрена при 5%-м уровне значимости; f_n = n – число независимых оценок дисперсии; f_u = (m-1) – число степеней свободы каждой оценки [10].

По критерию Стьюдента проверяли значимость коэффициентов. Доверительный интервал определяли по формуле [10]:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0.05; f_y)} \sqrt{\frac{s_y^2}{n}}, \quad (8)$$

где t_(0.05; f_y) – 5%-ная точка распределения Стью-

дента с f_y – степенями свободы; $s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n s_u^2}{n}$ – дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта) [10].

Для модели (5) доверительный интервал составляет 0.0476, поэтому коэффициент при (x₁ · x₃) считается незначимым. Для модели (6) доверительный интервал составляет 0.0937, поэтому коэффициент при (x₁ · x₃) также считается незначимым. Таким образом, модели (5) и (6) принимают такой вид:

$$Y_U = -0.296 \cdot x_1^2 - 1.496 \cdot x_2^2 - 1.352 \cdot x_3^2 + 25.5 \cdot x_1 + 28.71 \cdot x_2 + 16.268 \cdot x_3 - 0.107 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.133 \cdot x_2 \cdot x_3 - 549.98, \quad (9)$$

$$Y_T = 0.488 \cdot x_1^2 + 3.072 \cdot x_2^2 + 2.518 \cdot x_3^2 - 41.363 \cdot x_1 - 49.874 \cdot x_2 - 19.175 \cdot x_3 + 0.129 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.137 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1361.3.$$

Ошибка опыта при ротатбельном планировании может определяться по экспериментам в центре плана:

$$s_0^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}, \quad (11)$$

где y_{0u} – значение отклика в u -м опыте в центре плана при ротатбельном планировании [10].

Числитель формулы (11) представляет собой остаточную сумму квадратов в центре плана:

$$S_0 = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - y_0)^2. \quad (12)$$

Из выражения (11) очевидно, что с этой суммой связано число степеней свободы $f_0 = n_0 - 1$. Общая окончательная сумма квадратов плана:

$$S_{\text{общ}} = \sum_{u=1}^n (y_u - y_{\text{урасч}})^2, \quad (13)$$

с числом степеней свободы:

$$f_{\text{общ}} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2}. \quad (14)$$

Дисперсия адекватности модели характеризуется суммой:

$$S_{\text{ад}} = S_{\text{общ}} - S_0, \quad (15)$$

с числом степеней свободы

$$f_{\text{ад}} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2} - (n_0 - 1), \quad (16)$$

где k – количество факторов в эксперименте, в нашем случае $k = 3$ [10].

Дисперсия адекватности:

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{S_{\text{ад}}}{f_{\text{ад}}}. \quad (17)$$

Адекватность моделей проверяется по критерию Фишера:

$$F = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_0^2} \leq F_{(0.05; f_{\text{ад}}; f_y)}, \quad (18)$$

где $s_{\text{ад}}^2 = \sum_{u=1}^m (\bar{y}_u - y_u)^2 / (n - k - 1)$; y_u – расчетное значение отклика в u -м опыте; $F_{(0.05; f_{\text{ад}}; f_y)}$ – критерий Фишера при 5%-м уровне значимости; $f_{\text{ад}} = n - k - 1$ – число степеней свободы дисперсии адекватности; f_y – число степеней свободы дисперсии воспроизведения [10].

Таким образом, для модели (9) имеем по критерию Кохрена $0.7135 < 0.9065$ и для модели (10) $0.8492 < 0.9065$, то есть процессы воспроизводятся, а по критерию Фишера соответственно $5.394 < 7.7086$ и $6.257 < 7.7086$, то есть модели адекватные.

С привлечением изложенного выше математического аппарата в работе получены математические модели работы газового пожарного извещателя с полупроводниковым датчиком спиралевидного типа. Модели позволяют без дополнительных экспериментальных исследований рассчитывать значения

технологических и рабочих параметров, а также технических характеристик разработанного авторами газового пожарного извещателя.

С помощью построенных математических моделей работы ГПИ с ППД СТ можно провести оптимизацию параметров ППД СТ ГПИ (ток нагревателя, количество витков нагревателя и концентрация оксида титана), при которых аналитический сигнал и время насыщения ГПИ с ППД СТ будут иметь максимальное и минимальное значения соответственно. Оптимизацию параметров проводим следующим образом [11].

1. Для модели (9):

$$\frac{dY_U}{dx_1} = -0.592 \cdot x_1 - 0.107 \cdot x_2 + 25.5 = 0,$$

$$\frac{dY_U}{dx_2} = -2.938 \cdot x_2 - 0.107 \cdot x_1 + 0.133 \cdot x_3 + 28.71 = 0,$$

$$\frac{dY_U}{dx_3} = -2.704 \cdot x_3 + 0.133 \cdot x_2 + 16.268 = 0.$$

Решаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} -0.592 \cdot x_1 - 0.107 \cdot x_2 + 25.5 = 0, \\ -2.938 \cdot x_2 - 0.107 \cdot x_1 + 0.133 \cdot x_3 + 28.71 = 0, \\ -2.704 \cdot x_3 + 0.133 \cdot x_2 + 16.268 = 0, \end{cases}$$

откуда: $x_1 = 41.2$; $x_2 = 8.56$; $x_3 = 6.4$.

2. Для модели (10):

$$\frac{dY_T}{dx_1} = 0.976 \cdot x_1 + 0.129 \cdot x_2 - 41.363 = 0,$$

$$\frac{dY_T}{dx_2} = 6.144 \cdot x_2 + 0.129 \cdot x_1 - 0.137 \cdot x_3 - 49.874 = 0,$$

$$\frac{dY_T}{dx_3} = 5.036 \cdot x_3 - 0.137 \cdot x_2 - 19.175 = 0.$$

Решаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 0.976 \cdot x_1 + 0.129 \cdot x_2 - 41.363 = 0, \\ 6.144 \cdot x_2 + 0.129 \cdot x_1 - 0.137 \cdot x_3 - 49.874 = 0, \\ 5.036 \cdot x_3 - 0.137 \cdot x_2 - 19.175 = 0, \end{cases}$$

откуда: $x_1 = 41.43$; $x_2 = 7.34$; $x_3 = 4$.

Проанализировав поведение функций моделей (9) и (10), получили оптимальные значения

$$x_1 = 41.43, x_2 = 7.34 \text{ и } x_3 = 4,$$

которые обеспечивают максимальное значение аналитического сигнала (145 мВ) и минимальное значение времени насыщения ГПИ с ППД СТ (283 с).

Учитывая технологические особенности создания ППД СТ, а также особенности настройки рабочих параметров, значения факторов примем следующими:

$$x_1 = 41.5, x_2 = 7.5 \text{ и } x_3 = 4.$$

Они обеспечивают значение аналитического сигнала 145.3 мВ и время насыщения ГПИ с ППД СТ – 283.5 с.

Определяем время срабатывания ГПИ с ППД СТ (τ) от начала процесса пиролиза ТГМ при токе нагревателя 41.5 мА, количестве витков нагревателя 7.5 и концентрации оксида титана в ЧМ 4% (мас.):

$$\tau = Y_T^{\min} / 3. \quad (19)$$

Получаем $\tau = 94.5$ с.

Выводы

Построены математические модели зависимости аналитического сигнала и времени насыщения газового пожарного извещателя с полупроводниковым датчиком спиралевидного типа от величины тока нагревателя, количества витков нагревателя и концентрации оксида титана. Проведен выбор оптимальных рабочих и технологических параметров ГПИ с ППД СТ. С помощью построенных математических моделей определены наиболее эффективный режим и конструкционные параметры функционирования ГПИ с ППД СТ: ток нагревателя – 41.5 мА, число витков нагревателя – 7.5, концентрация оксида титана в ЧМ ППД СТ – 4% (мас.), которые обеспечивают минимальное время срабатывания ГПИ с ППД СТ – 94.5 с.

Список литературы

1. Шаровар Ф.И. Методы раннего обнаружения загораний / Ф.И. Шаровар – М.: Стройиздат, 1988. – 337 с.
2. Скорфильд С. Мировые тенденции развития рынка пожарных извещателей (техника и технологии: прошлое, настоящее и будущее). [Электронный ресурс] / С. Скорфильд. – Режим доступа к ресурсу: http://ss.groteck.ru/articles2/OPS_sign/mirovie_tendencii. – Заголовок с экрана.
3. Федоров А.В. Экспериментальные исследования полей концентраций водорода и оксида углерода на ранней стадии пожара в помещениях и определение рациональных мест установки газовых пожарных извещателей /

А.В. Федоров, А.А. Лукьяненко, А.В. Соколов // Пожаро-взрывобезопасность. – 2006. – №3. – С. 74-84.

4. Прусский А.В. Анализ состояния проблемы выявления начальной стадии процесса горения (тления) горючих материалов с помощью пожарных извещателей / А.В. Прусский, В.Д. Калугин, А.Ю. Войтов // Проблемы пожарной безопасности. – 2007. – Вып. 21. – С. 208-217.

5. Антоненко В.И. Раннее обнаружение пожара: полупроводниковые газовые сенсоры / В.И. Антоненко, А.А. Васильев, И.М. Олихов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2001. – №4. – С. 48-51.

6. Федоров А.В. Применение газовых сенсоров в системах автоматической пожарной сигнализации / А.В. Федоров, А.А. Лукьяненко // Мир и безопасность, 2004. – № 4. – С. 28-30.

7. Васильев А.А. Газовые сенсоры для пожарных извещателей / А.А. Васильев, И.М. Олихов, А.В. Соколов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2005. – №2. – С. 24-27.

8. Кренецкий И.И. Основы научных исследований: [уч. пособие для вузов] / И.И. Кренецкий. – Киев – Одесса, 1981. – 208 с.

9. Box G.E.P. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions / G.E.P. Box, K.B. Wilson // Journal of the Royal Statistical Society. Series B, 1951. – 13, № 1. – P. 1-45.

10. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.

11. Прусский А.В. Оптимизация технических характеристик газового пожарного извещателя с полупроводниковым чувствительным элементом спиралевидного типа / А.В. Прусский, В.Д. Калугин // Проблемы пожарной безопасности. – 2008. – Вып. 24. – С. 131-139.

Поступила в редколлегию 6.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.И. Азаров, Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗОВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА З НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ДАТЧИКОМ СПІРАЛЕВИДНОГО ТИПУ

А.В. Пруський, В.Д. Калугін, О.Ю. Войтов

Отримані математичні моделі роботи газового пожежного сповіщувача з напівпровідниковим датчиком спіралевидного типу. Моделі дозволяють без додаткових експериментальних досліджень набувати значень технологічних і робочих параметрів, а також технічних характеристик розробленого авторами газового пожежного сповіщувача.

Ключові слова: пожежа, пожежні сповіщувачі, тверді горючі матеріали, термічне розкладання (тління), газовий пожежний сповіщувач, напівпровідниковий датчик, струм нагрівача, кількість витків нагрівального елемента, концентрація оксиду титану, критерій Кохрена, критерій Стьюдента, критерій Фішера, математичні моделі, мінімальний час спрацювання.

MATHEMATICAL MODEL OF THE GAS FIRE DETECTOR WITH THE SEMI-CONDUCTOR GAGE OF HELICOID TYPE

A.V. Prusskiy, V.D. Kalugin, A.Y. Voitov

Mathematical models of work of the gas fire detector with the semi-conductor gage of helicoid type which allow to receive values of technological and working parameters, and also technical characteristics detector are received.

Keywords: fire, fire detector, hard combustible materials, thermal decomposition (decay), gas fire detector, semiconductor sensor, current of heater, amount of coils of heater element, concentration of oxide of titan, criterion of Kokhren, criterion of St'udent, criterion of Fisher, mathematical models, minimum time of wearing-out.