

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.248

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-83-98

Анализ надежности таблетпресса GZP-32 на основе винеровской деградационной модели^{*}

Е.А. ОСИНЦЕВА^{1,а}, В.В. ЗАРЕМБА^{2,б}

¹ 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 23, ООО «С7 Техлаб»

² 633004, Новосибирская область, г. Бердск, ул. Химзаводская 11/20, ООО «Siberian Wellness»

^а osinceva.j@gmail.com ^б zaremba.w@yandex.ru

В настоящей статье рассматривается задача анализа надежности таблеточного пресса (таблетпресс) GZP-32 на основе данных о его деградации, полученных в ходе двух последовательных экспериментов. В рамках первого эксперимента проводился сбор информации о процессе деградации ключевых узлов и компонентов оборудования, что позволило разработать винеровскую деградационную модель с учетом ковариат. Эта модель легла в основу оптимального плана для повторного эксперимента, направленного на уточнение параметров деградации, повышение точности прогнозов надежности и разработку мер по предотвращению отказов.

Для построения оптимального плана использовался модифицированный алгоритм прямого поиска, основанный на винеровской деградационной модели с учетом ковариат. Важным аспектом метода стало соблюдение ограничений, связанных с достижением критического значения показателя деградации. Оптимизация проводилась поэтапно: на первом этапе определялись оптимальные значения вектора ковариат и весов на основе функционала от условной информационной матрицы Фишера, а на втором этапе, при необходимости, оптимизировались моменты времени измерения деградационного показателя по функционалу от информационной матрицы Фишера. Второй этап рекомендуется проводить при нелинейной функции тренда, а также при малом количестве экспериментальных точек.

Проведение повторного эксперимента позволило уточнить параметры модели, повысить точность прогнозирования отказов и оценить влияние различных факторов на процесс деградации. В результате анализа были сформулированы практические рекомендации по увеличению эксплуатационной надежности таблетпресса, снижению вероятности отказов и повышению эффективности его работы в производственных условиях, что может способствовать увеличению срока службы оборудования и снижению затрат на его техническое обслуживание.

Ключевые слова: винеровская деградационная модель, ковариаты, надежность, критическое значение показателя деградации, оптимальный план эксперимента, информационная матрица Фишера, условная информационная матрица Фишера, таблетпресс

^{*} Статья получена 06 февраля 2025 г.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время предприятия стали уделять особое внимание качественному обслуживанию производственных линий, стремясь минимизировать простои и повысить их надежность. Современные подходы к решению этих задач основаны на внедрении систем мониторинга оборудования и контроля ключевых параметров с использованием специализированных датчиков. Собранные данные агрегируются в информационных системах и предоставляются профильным специалистам для экспертной оценки.

Зачастую такой мониторинг позволяет определить момент, когда оборудование достигает критических значений, установленных производителем или указанных в технологической карте обслуживания. Однако при этом информация о нестабильной работе оборудования поступает с запозданием и ресурсы инженеров направляются на устранение последствий поломки, а не на предупреждение возможных неисправностей. В случаях, когда целью является минимизация сбоев, необходимо переходить к прогностическим моделям, которые способны заблаговременно предсказать выход оборудования из строя.

Прогностические модели в обслуживании оборудования можно разделить на несколько типов: статистические модели, физико-математические модели и гибридные модели. Деградационные модели относятся к классу физико-математических моделей и позволяют оценить состояние оборудования на основе его физического состояния [1,2].

Для проведения анализа надежности необходимо построить вероятностную модель на основе деградационных данных. Для получения более точных оценок параметров модели такие эксперименты проводят несколько раз. На практике для ускорения процесса сбора данных проводят ускоренные эксперименты с повышенными нагрузками, которые позволяют получить данные в короткие сроки [3].

Для минимизации временных затрат на проведение повторного эксперимента при сохранении статистической достоверной информации используют методы оптимального планирования эксперимента, в основе которых лежит оптимизация некоторой целевой функции [4, 5]. Выбор целевой функции и параметры оптимизации оказывает существенное влияние на результат оптимального планирования эксперимента [6–8].

В предыдущих работах [9–11] в основе алгоритма была предложена оптимизация суммы определителей информационной матрицы Фишера и условной информационной матрицы Фишера для нахождения оптимальных величин нагрузок, весов и моментов времени измерения деградационного показателя. Но наилучшее ли это соотношение между оценками по разным критериям, или стоит отдать предпочтение другим методам согласования критериев?

Подобранная модель по результатам основных и повторных экспериментов позволяет сформулировать рекомендации для повышения надежности и обеспечения бесперебойной работы в течение фиксированного промежутка времени при специальных условиях.

В настоящей работе проведен анализ надежности таблетпресса GZP-32 с целью формулирования рекомендаций для минимизации рисков поломки ключевых элементов оборудования.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таблеточный пресс GZP-32 находит широкое применение в различных областях. После запуска оборудования и загрузки материала таблетпресс выполняет весь процесс производства от подачи сырья, наполнения, дозировки, предварительного и основного прессования до вывода готовой продукции. На рис. 1 представлен процесс эксплуатации таблеточного пресса GZP-32.

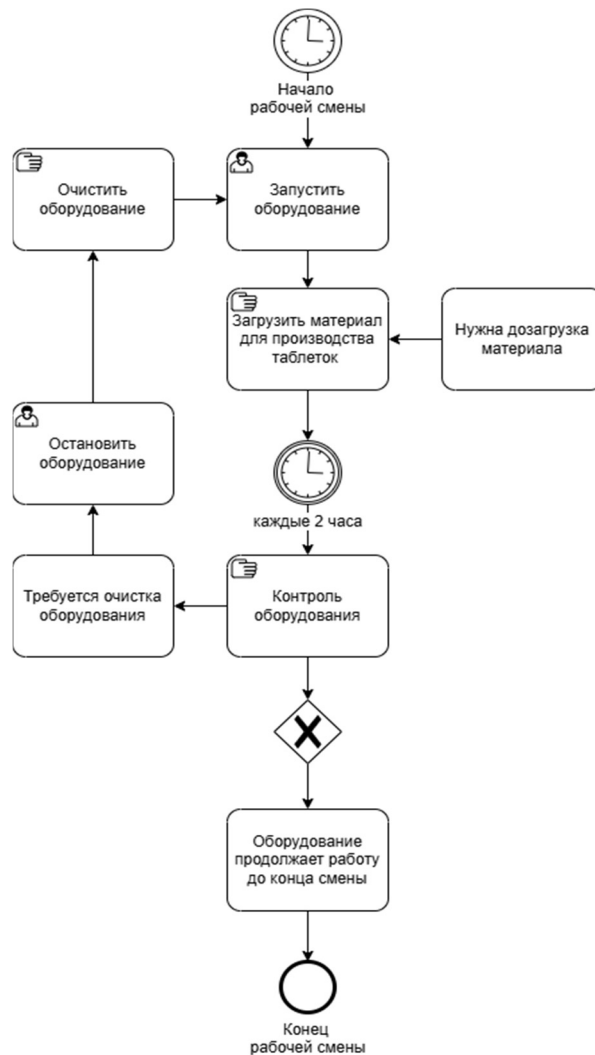


Рис. 1. Процесс эксплуатации таблетпресс GZP-32

Fig. 1. Process of tablet press operation GZP-32

Для сбора данных о деградации была установлена система мониторинга оборудования, оснащенная датчиками вибрации и тока, что обеспечило возможность отслеживания состояния устройства в реальном времени и обнаружения первых признаков износа. Параллельно с этим для мониторинга окружающей среды использовались данные о температуре и влажности, получаемые с системы контроля помещений.

В июле 2023 года было зафиксировано восемь поломок пуансона. С целью повышения надежности и предотвращения поломок в течение 7-часовой смены предлагается провести статистический анализ полученных данных и сформулировать рекомендации по выбору режимов эксплуатации оборудования. Для этого необходимо:

- 1) построить вероятностную модель, описывающую зависимость вероятности безотказной работы оборудования от влажности воздуха, на основе данных об изменении показателя деградации до достижения им критического уровня;
- 2) построить оптимальный план эксперимента для проведения повторных испытаний с целью уточнения параметров модели;
- 3) провести повторные испытания по результатам оптимального планирования эксперимента;
- 4) на основе итоговой модели сформулировать рекомендации об условиях эксплуатации оборудования с целью минимизации риска поломок пуансона.

Для моделирования распределения времени наступления отказов, основанного на данных о деградации в зависимости от величин нагрузок (ковариат), часто используют винеровскую, гамма- и обратную гауссовскую модели [12–14]. Применение гамма- и обратной гауссовской моделей возможно только при положительном изменении деградационного показателя, в иных случаях предпочтительно использование винеровской модели.

На рис. 2 представлены графики изменения вибрации и силы тока в течение одной смены. Близость к нулю показателя вибрации означает, что оборудование было остановлено для дозагрузки материала. Как видно из графиков, изменения силы тока и вибрации не являются монотонными. Кроме того, можно заметить, что в течение смены наблюдается тенденция к росту обоих показателей, что говорит о том, что чем больше загрязнение оборудования, тем выше сила тока и вибрация.

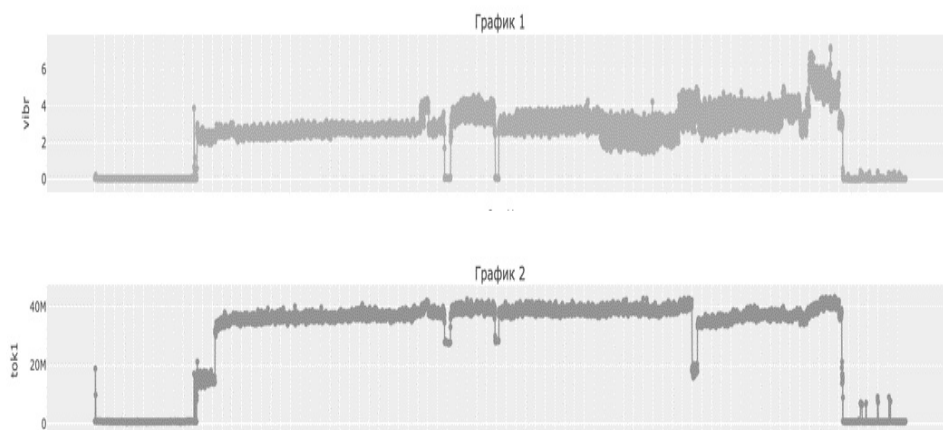


Рис. 2. Графики, отображающие изменения вибрации (верхний) и силы тока (нижний)

Fig. 2. Graphs showing changes in vibration (top) and current (bottom)

В качестве показателя деградации принимается значение силы тока, поскольку разброс значений силы тока относительно его скользящего среднего ниже, чем для вибрации.

1.1. ВИНЕРОВСКАЯ ДЕГРАДАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Случайный процесс с независимыми приращениями $Z(t)$, характеризующий процесс деградации исследуемых изделий, называется винеровским деградационным процессом, если приращения подчиняются нормальному закону распределения с функцией плотности:

$$f(u, \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{\theta_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(u - \theta_1)^2}{2\theta_2^2}\right), \quad (1)$$

где $\theta_1 = \mu(\rho(t + \Delta t) - \rho(t))$ – параметр сдвига; $\theta_2 = \sigma\sqrt{\rho(t + \Delta t) - \rho(t)}$ – параметр масштаба, $\sigma > 0$, $\rho(t)$ – положительная возрастающая функция; $Z(0) = 0$.

Предполагается, что деградационный процесс наблюдается при некоторой постоянной во времени нагрузке (ковариате) x , диапазон значений которой определяется условиями проведения эксперимента и представляет собой отрезок числовой прямой. В общем случае ковариата x представляет собой векторную величину, поскольку может учитываться влияние нескольких факторов (например, температуры, напряжения, давления и прочих). Однако в настоящей работе для упрощения математических выражений ковариата рассматривается как скалярная величина.

Влияние ковариаты на изменение деградационного показателя в ходе проведения ускоренного эксперимента можно определить следующим образом:

$$Z_x(t) = Z(t / r(x; \beta)), \quad (2)$$

где $r(x; \beta)$ – положительная возрастающая функция, β – регрессионный параметр. В этом случае математическое ожидание $Z_x(t)$ имеет вид

$$E(Z_x(t)) = \mu\rho(t / r(x; \beta); \gamma). \quad (3)$$

Время наработки до отказа представляет собой случайную величину:

$$\tau = \sup\{t : Z_x(t) \leq z_0\}, \quad (4)$$

где z_0 – критический уровень показателя деградации. Таким образом, функцию надежности можно записать в следующем виде:

$$S(t) = P\{\tau > t\} = P\{Z_x(t) < z_0\} = \Phi\left(\frac{z_0 - \mu\rho(t / r(x; \beta); \gamma)}{\sigma\sqrt{\rho(t / r(x; \beta); \gamma)}}\right). \quad (5)$$

Обозначим выборку приращений деградационного показателя, полученную в результате наблюдения деградационных процессов n объектов, следующим образом:

$$\mathbf{X}_n = \{(\Delta Z_{1j}, x_1), (\Delta Z_{2j}, x_2), \dots, (\Delta Z_{nj}, x_n), j = \overline{1, k_i}\}, \quad (6)$$

где для каждого i -го объекта k_i – количество измерений деградационного показателя; x_i – значение ковариаты; $\Delta Z_{ij} = Z_i(t_j) - Z_i(t_{j-1})$ – значение приращения деградационного показателя в интервале от t_{j-1} до t_j .

Моменты времени измерения деградационного показателя:

$$0 = t_0 < t_1 \dots < t_{k_i}, \quad t_{k_i} \leq \sup\{t : Z_{x_i}(t) \leq z_0\}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Неизвестные параметры модели оцениваются методом максимального правдоподобия (ОМП).

1.2. НОРМАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИНЕРОВСКОЙ ДЕГРАДАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Для анализа деградационных данных необходимо в первую очередь устранить промежутки простоя оборудования на основе данных о вибрации и произвести объединение соответствующих промежутков измерения силы тока, так как дозагрузка материала не влияет на состояние оборудования. После преобразования данных шкала по времени носит неинформативный характер, так как не отражает фактическое время наработки оборудования до отказа. В этом случае предлагается использовать альтернативный вариант – количество килограммов материала, отработанного таблетпрессом до отказа. В среднем в течение часа перерабатывается 50 кг материала. Кроме того, для построения винеровской деградационной модели необходимо центрировать данные путем оценивания процента изменения силы тока относительно начального значения.

Деградационный процесс, полученный после проделанных преобразований, выглядит следующим образом (рис. 3).



Рис. 3. Преобразованный деградационный процесс

Fig. 3. Transformed degradation process

За критическое значение показателя деградации z_0 принимается изменение силы тока на 40 %, при достижении которого были зафиксированы поломки пуансона во всех наблюдаемых процессах.

1.3. ОЦЕНКА НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИНЕРОВСКОЙ ДЕГРАДАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим винеровскую деградационную модель с линейной функцией тренда $\rho(t) = t$ при различных функциях от ковариат:

- логарифмическая модель: $r_1(x, \beta) = \exp(\beta x)$;
- степенная модель: $r_2(x, \beta) = x^\beta = \exp(\beta \ln(x))$, $x > 0$;
- функция Аррениуса: $r_3(x, \beta) = \exp(\beta / x)$.

Оценки максимального правдоподобия неизвестных параметров для рассмотренных винеровских моделей деградации, а также полученные значения информационных критериев AIC и BIC приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Результаты оценивания неизвестных параметров (σ , μ , β) винеровской деградационной модели с линейной функцией тренда

Results of unknown parameters (σ , μ , β) estimation of the Wiener degradation model with a linear function trend

Функция от ковариат	Логарифмическая	Степенная	Аррениуса
Оценки параметров	(0,138; 0,049; -0,033)	(0,286; 0,0008; -1,46)	(0,987; 1,020; 63.419)
AIC	126	130	128
BIC	208	212	210

Как видно из табл. 1, винеровская деградационная модель с линейной функцией тренда, где влияние влажности описывается степенной функцией от ковариат, оказалась более предпочтительной моделью по результатам исследований:

$$f(u, \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi(t / e^{\beta \ln(x)})}} \exp\left(-\frac{(u - \mu(t / e^{\beta \ln(x)}))^2}{2\sigma^2(t / e^{\beta \ln(x)})}\right), \quad (8)$$

с параметрами $\hat{\sigma} = 0,286$, $\hat{\mu} = 0,0008$, $\hat{\beta} = -1,46$.

На рис. 4 представлены графики функций тренда и данные деградации оборудования за 20 рабочих смен.

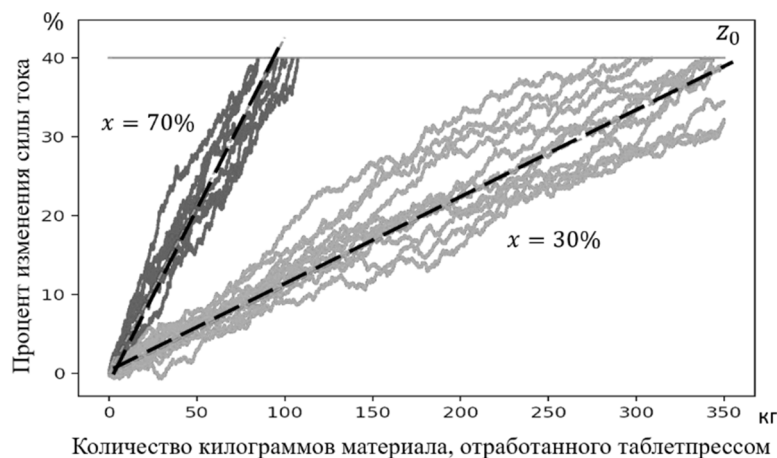


Рис. 4. Деградационные процессы, основанные на данных о деградации таблетпресса GZP-32

Fig. 4. Degradation processes based on degradation data of the Tabletpress GZP-32

При 70-процентной влажности в помещении 8 деградационных процессов, в рамках которых зафиксирована поломка пуансона, достигли критического значения показателя деградации. Остальные процессы наблюдались при влажности 30 %. Пунктирной линией отображены функции тренда для деградационных процессов при соответствующих показателях влажности в помещении.

На графиках наглядно видно, что при повышенной влажности в помещении критическое значение показателя деградации достигается быстрее, что приводит к выводу из строя ключевых элементов.

2. МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТА

Повышение точности ОМП параметров винеровской деградационной модели в конечном итоге позволит получить более точные оценки показателей надежности. В [15] было показано, что выбор моментов времени измерения деградационного показателя может оказать существенное влияние на точность получаемых оценок неизвестных параметров по наблюдаемым данным. Поэтому на практике этап планирования эксперимента является очень важным.

2.1. РЕШЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

В работах [9] и [10] были получены элементы информационной матрицы Фишера (ИМФ) и условной информационной Фишера (УИМФ) для винеровской деградационной модели с ковариатами, а также предложен алгоритм для нахождения оптимальных значений вектора ковариат, весов и моментов времени измерения деградационного показателя с учетом критического

значения показателя деградации. Однако данный алгоритм был основан на оптимизации взвешенной суммы определителей ИМФ и УИМФ.

Действительно, на практике аддитивный способ является одним из наиболее распространенных методов. Но как при использовании данного метода должны распределяться веса? Альтернативным вариантом решения многокритериальных задач является метод последовательной оптимизации, при котором каждому критерию присваивается приоритет, определяющий очередность решения однокритериальных задач.

Таким образом, предлагается использовать метод последовательной оптимизации, в рамках которого на первом этапе оптимизируется функционал от УИМФ и определяются оптимальные значения вектора ковариат и весов, а на втором этапе оптимизируется функционал от ИМФ с целью определения оптимальных значений моментов времени измерения деградационного показателя. Второй этап может быть опциональным в зависимости от сложности получения деградационного показателя, а также вида функции тренда. Если экспериментальных точек мало, то исследования подтверждают, что за счет их перераспределения можно увеличить количество информации об эксперименте в случае нелинейного тренда [7].

2.2. АЛГОРИТМ ПРЯМОГО ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТА

Алгоритм прямого поиска оптимального плана эксперимента предполагает решение задачи последовательной оптимизации целевых функций от УИМФ для получения оптимальных величин нагрузок $x_{(1)}, \dots, x_{(q)}$ и весов $\omega_1, \dots, \omega_q$ и ИМФ получения оптимальных моментов времени измерения деградационного показателя $t_{1_1}, \dots, t_{k_1}, \dots, t_{1_q}, \dots, t_{k_q}$.

Таким образом, предлагаемый алгоритм поиска оптимального плана эксперимента можно сформулировать в следующем виде.

Этап 1. Оптимизация целевой функции от УИМФ для получения оптимальных величин нагрузок $x_{(1)}, \dots, x_{(q)}$ и весов $\omega_1, \dots, \omega_q$.

Шаг 1. Установить $iter = 0$ и задать начальный план эксперимента:

$$\xi^{iter} = \begin{Bmatrix} x_{(1)}^{iter} & \dots & x_{(q)}^{iter} \\ \omega_1^{iter} & \dots & \omega_q^{iter} \\ t_{k_1}^{iter} & \dots & t_{k_q}^{iter} \end{Bmatrix}. \quad (9)$$

Шаг 2. Вычислить УИМФ $I(\xi^{iter} | Z_{k_1} \leq z_0, \dots, Z_{k_q} \leq z_0)$.

Шаг 3. Зафиксировать $\omega_1^{iter}, \dots, \omega_q^{iter}$ и решить оптимизационную задачу:

$$M \left(I(\xi^{iter} | Z_{k_1} \leq z_0, \dots, Z_{k_q} \leq z_0) \right) \rightarrow \max_{x_{(1)}, \dots, x_{(q)}, t_{k_1}, \dots, t_{k_q}}. \quad (10)$$

Вычислить УИМФ $I(\xi | Z_{k_1} \leq z_0, \dots, Z_{k_q} \leq z_0)$ в соответствии с полученным планом:

$$\xi = \begin{Bmatrix} x_{(1)}^{iter+1} & \dots & x_{(q)}^{iter+1} \\ \omega_1^{iter} & \dots & \omega_q^{iter} \\ t_{k_1}^{iter+1} & \dots & t_{k_q}^{iter+1} \end{Bmatrix}. \quad (11)$$

Перейти к следующему шагу.

Шаг 4. Зафиксировать $x_{(1)}^{iter+1}, \dots, x_{(q)}^{iter+1}, t_{k_1}^{iter+1}, \dots, t_{k_q}^{iter+1}$ и решить оптимизационную задачу:

$$M\left(I(\xi | Z_{k_1} \leq z_0, \dots, Z_{k_q} \leq z_0)\right) \rightarrow \max_{\omega_1, \dots, \omega_q}. \quad (12)$$

Вычислить УИМФ $I(\xi | Z_{k_1} \leq z_0, \dots, Z_{k_q} \leq z_0)$ в соответствии с полученным планом:

$$\xi = \begin{Bmatrix} x_{(1)}^{iter+1} & \dots & x_{(q)}^{iter+1} \\ \omega_1^{iter+1} & \dots & \omega_q^{iter+1} \\ t_{k_1}^{iter+1} & \dots & t_{k_q}^{iter+1} \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

Шаг 5. Проверить условие окончания первого этапа алгоритма для плана

$$\xi^{iter+1} = \begin{Bmatrix} x_{(1)}^{iter+1} & \dots & x_{(q)}^{iter+1} \\ \omega_1^{iter+1} & \dots & \omega_q^{iter+1} \\ t_{k_1}^{iter+1} & \dots & t_{k_q}^{iter+1} \end{Bmatrix}. \quad (14)$$

Если для небольшого положительного числа ε неравенство

$$\left| M\left(I(\xi^{iter+1} | Z_{k_1} \leq z_0, \dots, Z_{k_q} \leq z_0)\right) - M\left(I(\xi^{iter} | Z_{k_1} \leq z_0, \dots, Z_{k_q} \leq z_0)\right) \right| \leq \varepsilon$$

выполняется, то оптимальный план ξ^* эксперимента найден, в противном случае установить $iter = iter + 1$ и повторить шаги 2–5.

Этап 2. Оптимизация целевой функции от ИМФ для получения оптимальных моментов времени измерения деградации $t_{11}, \dots, t_{(k-1)1}, \dots, t_{1q}, \dots, t_{(k-1)q}$.

Зафиксировать точки плана, полученные в результате выполнения этапа 1, и решить оптимизационную задачу:

$$M(I(\xi^*)) \rightarrow \max_{t_{11} < \dots < t_{k1}^*, \dots, t_{1q} < \dots < t_{kq}^*}, \quad (15)$$

где $t_{k_i}^* \leq \sup\{t : Z_{x_i}(t) \leq z_0\}$, $i = \overline{1, q}$ получены в результате оптимизации на первом этапе.

Вычислить ИМФ в соответствии с полученным планом.

2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ТАБЛЕТПРЕСС GZP-32

По результату оценивания неизвестных параметров наиболее предпочтительной моделью является винеровская деградационная модель с линейной функцией тренда, где влияние влажности описывается степенной функцией от ковариат (8) с параметрами $\hat{\sigma} = 0,286$; $\hat{\mu} = 0,0008$; $\hat{\beta} = -1,46$.

Используя алгоритм из раздела 2.2, получим D -оптимальный план на основе оптимизации определителя УИМФ. Оптимизация определителя ИМФ (этап 2 алгоритма) не требуется, так как в случае линейной функции тренда перераспределение моментов времени измерения деградационного показателя не влияет на точность получаемых оценок.

В табл. 2 приведены исходный план и полученный D -оптимальный план, а также соответствующие значения определителя УИМФ.

Таблица 2

Table 2

Сравнение определителя от УИМФ для начального и оптимального плана эксперимента

Comparison of the CFIM determinant for the initial and optimal experimental design

Значения	План	УИМФ
Начальные	$\xi^0 = \begin{Bmatrix} 30 & 70 \\ 0,6 & 0,4 \end{Bmatrix}$	$1,38e + 21$
Оптимальные	$\xi = \begin{Bmatrix} 36 & 55 \\ 0,5 & 0,5 \end{Bmatrix}$	$1,65e + 21$

Увеличение значения УИМФ в 1,2 показывает, что найденный оптимальный план содержит набор экспериментальных точек для проведения последующих исследований с сохранением статистической достоверной информации.

2.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПОВТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТА

По результату проведения повторного эксперимента получены оценки неизвестных параметров винеровской деградиационной модели с линейной функцией тренда, где влияние влажности описывается степенной функцией от ковариат (8): $\hat{\sigma} = 0,201$; $\hat{\mu} = 0,0009$; $\hat{\beta} = -1,3$.

3. АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ТАБЛЕТПРЕССА GZP-32

Под надежностью системы подразумевается способность системы сохранять свои свойства (безотказность, восстанавливаемость, защищенность и др.) на заданном уровне в течение фиксированного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации. Основные показатели надежности позволяют оценить эффективность работы системы и выявить потенциальные риски. К числу ключевых показателей надежности относятся:

- 1) единичные показатели надежности;
- 2) комплексные показатели надежности;
- 3) показатели долговечности.

В качестве единичных показателей надежности выделяют вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа, интенсивность отказа и другие. Комплексные показатели надежности позволяют оценить вероятность работоспособности системы в течение заданного времени и с учетом плановых простоев, в то время как средний срок службы (или ожидаемое время, за которое система достигнет критического значения показателя деградации) относится к показателям надежности.

Для ответа на вопрос, поставленный в рамках настоящей работы, построим зависимость, определяющую среднее время наработки до отказа в зависимости от влажности в помещении с целью формулирования рекомендации по выбору режимов эксплуатации оборудования.

Таблица 3

Table 3

**Зависимость между средним временем наработки до отказа оборудования
и влажностью в помещении**

**The relationship between the average operating time before equipment shutdown
and room humidity**

Влажность, %	Среднее количество отработанных килограммов продукции, кг	Среднее время безотказной работы, ч
30	534	≈ 10,5
35	437	≈ 9
40	367	≈ 7,5
45	315	≈ 6,5

Окончание табл. 3

End of the Tab. 3

Влажность, %	Среднее количество отработанных килограммов продукции, кг	Среднее время безотказной работы, ч
50	275	≈ 5,5
55	243	≈ 5
60	217	≈ 4,5
65	195	≈ 4
75	177	≈ 3,5

В результате проведенных исследований было установлено, что при повышенной влажности оборудование требует полной очистки в два-три раза чаще. Однако ресурсы инженеров ограничены, что делает необходимым внедрение более системного подхода к решению этой проблемы. В случае технической возможности оснастки помещения специализированными осушителями рекомендована влажность не более 40 %. Эта рекомендация не только позволит снизить потребность в частой чистке оборудования, но и поможет продлить срок его службы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье предложена модификация прямого алгоритма построения оптимального плана эксперимента на основе винеровской деградационной модели с ковариатами с учетом ограничений достижения критического значения показателя деградации. С использованием предложенного алгоритма построена вероятностная модель для анализа надежности оборудования таблетпресс GZP-32.

В ходе исследования было установлено, что при повышенной влажности оборудование необходимо очищать в два-три раза чаще. Однако более эффективным решением является использование специализированных осушителей в помещении, которое способствует сохранению целевого количества наработок таблеток за смену и снизить риск поломки пуансона. Рекомендованная влажность в помещении не более 40 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A review on degradation models in reliability analysis / N. Gorjian, L. Ma, M. Mittinty, P. Yarlaga, Y. Sun // Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management. – Athens, Greece, 2009. – P. 369–384. – DOI: 10.1007/978-0-85729-320-6_42.
2. Ling M.H., Tsui K.L., Balakrishnan N. Accelerated degradation analysis for the quality of a system based on the gamma process // IEEE Transactions on Reliability. – 2015. – Vol. 64 (1). – P. 463–472. – DOI: 10.1109/TR.2014.233707.
3. Wang C., Hu Q., Yu D. Wiener processes with random initial degradation values for step-stress accelerated degradation tests data // 2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Relia-

bility and Maintenance Modeling (APARM). – Vancouver, BC, Canada, 2020. – DOI: 10.1109/APARM49247.2020.9209514.

4. Анализ методов оценки надежности оборудования и систем. Практика применения методов / Е.М. Лаврищева, Н.В. Пакулин, А.Г. Рыжов, С.В. Зеленев // Труды Института системного программирования РАН. – 2018. – Т. 30, вып. 3. – С. 99–120. – DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-8.

5. *Налимов В.В., Голикова Т.И.* Логические основания планирования эксперимента. – М.: Металлургия, 1981. – 151 с.

6. *Осинцева Е.А., Чимитова Е.В.* Анализ надежности таблетпресса GZP-32 на основе винеровской деградиционной модели // Наука. Технологии. Инновации. В 8 ч. Ч. 1: сборник научных трудов. – Новосибирск, 2025. – С. 170–177.

7. *Guan Q., Tang Y.C., Xu A.C.* Objective Bayesian analysis accelerated degradation test based on wiener process // Applied Mathematical Modelling. – 2016. – Vol. 40 (4). – P. 2743–2755.

8. *Ye Z.-S., Chen N., Shen Y.* A new class of Wiener process models for degradation // Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – Vol. 139. – P. 58–67.

9. *Chimitova E.V., Osintseva E.A.* Optimal design of reliability experiment based on the Wiener degradation model with covariates // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 59. – С. 23–33. – DOI: 10.17223/19988605/59/3.

10. *Osintseva E., Chimitova E.* Optimal design of reliability experiment based on the Wiener degradation model under limitation for the degradation index // Engineering Proceedings. – 2023. – Vol. 33 (1). – P. 64. – DOI: 10.3390/engproc2023033064.

11. *Осинцева Е.А., Чимитова Е.В.* Оптимальное планирование эксперимента на основе винеровской деградиционной модели с ковариатами с использованием условной информационной матрицы Фишера // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 67. – С. 9–19. – DOI: 10.17223/19988605/67/9.

12. *Pan D., Liu J.B., Cao J.* Remaining useful life estimation using an inverse Gaussian degradation model // Neurocomputing. – 2016. – Vol. 185. – P. 64–72.

13. *Chetvertakova E.S., Chimitova E.V.* The Wiener degradation model with random effects in reliability metrology // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI. – Glasgow: World Scientific, 2018. – P. 162–169.

14. Modeling and analysis of performance degradation data for reliability assessment: A review / S. Li, Z. Chen, Q. Liu, W. Shi, K. Li // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 74648–74678. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2987332.

15. *Осинцева Е.А.* Исследование свойств оценок максимального правдоподобия параметров Винеровской деградиционной модели // Молодежь. Наука. Инновации. Т. 1: сборник докладов. – Владивосток, 2016. – С. 151–156.

Осинцева Евгения Алексеевна, выпускник аспирантуры на кафедре теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование, винеровские деградиционные модели, оптимальное планирование эксперимента. Имеет более 20 печатных работ. E-mail: osinceva.j@gmail.com

Заремба Виктор Викторович, выпускник факультета автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета по направлению «Автоматизация и управление», специальность «Управление и информатика в технических системах». Основное направление деятельности – инженер систем автоматизации департамента информационных технологий в компании Siberian Wellness. E-mail: zaremba.w@yandex.ru

Osintseva Evgeniya A., graduate from the postgraduate program at the Department of Theoretical and Applied Computer Science in Novosibirsk State Technical University. The main area of her scientific research is mathematical modeling, Wiener degradation models, and experimental planning. She has more than 20 publications.

Zarembo Viktor V., graduate from the Faculty of Automation and Computer Engineering in the field of Automation and Control, Novosibirsk State Technical University. His major is Control and Informatics in technical systems. The main area of his activity is automation systems engineer at the information technology department in the Siberian Wellness Company. E-mail: zarembo.w@yandex.ru

The problem of reliability analysis of the tablet press GZP-32 based on the Wiener degradation model *

E.A. OSINTSEVA^{1,a}, V.V. ZAREMBA^{2,b}

¹ "C7 Tekhlab" LLT, 23 Kirova Street, Novosibirsk, 630102, Russian Federation

² "Siberian Wellness" LLT, 11/20 Himzavodskaya Street, Berdsk, 633004, Russian Federation

^a osintseva.j.@gmail.com ^b zaremba.w@yandex.ru

Abstract

This article discusses the reliability analysis of the GZP-32 tablet press based on degradation data obtained from two sequential experiments. The first experiment involved collecting information regarding the degradation process of key units and components of the equipment, which enabled the development of a Wiener degradation model with covariates. This model served as the foundation for an optimal design for a follow-up experiment aimed at refining the degradation parameters, enhancing reliability predictions, and formulating measures to prevent failures.

An optimized design was developed using a modified direct search algorithm based on the Wiener degradation model with covariates. A significant aspect of this method was adhering to constraints related to achieving the limitation for the degradation index. The optimization process was carried out in stages: initially, optimal values for the covariate vector and weights were determined based on the conditional Fisher information matrix functional, and subsequently, if necessary, the timing for measuring the degradation indicator was optimized according to the functional of the Fisher information matrix. The second stage is recommended to be carried out with a nonlinear trend function of the Wiener degradation model, as well as with a small number of experimental points.

The follow-up experiment allowed for the refinement of model parameters, improved failure prediction accuracy, and assessment of the impact of various factors on the degradation process. As a result of the analysis, practical recommendations were formulated to enhance the operational reliability of the tablet press, reduce failure probabilities, and increase operational efficiency in production conditions, which may contribute to extending equipment service life and lowering maintenance costs.

Keywords: Wiener Degradation Model, covariates, reliability, the limitation for the degradation index, optimal design, Fisher information matrix, conditional Fisher information matrix, tablet press

REFERENCES

1. Gorjian N, Ma L, Mittinty M, Yarlagadda P., Sun Y. A review on degradation models in reliability. *Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management*, Athens, Greece, 2009, pp. 369–384. DOI: 10.1007/978-0-85729-320-6_42.
2. Ling M.H., Tsui K.L., Balakrishnan N. Accelerated degradation analysis for the quality of a system based on the gamma process. *IEEE Transactions on Reliability*, 2015, vol. 64 (1), pp. 463–472. DOI: 10.1109/TR.2014.233707.
3. Wang C., Hu Q., Yu D. Wiener processes with random initial degradation values for step-stress accelerated degradation tests data. *2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM)*, Vancouver, BC, Canada, 2020. DOI: 10.1109/APARM49247.2020.9209514.
4. Lavrisheva E.M., Pakulin N.V., Ryzhov A.G., Zelenov S.V. Анализ методов оценки надежности оборудования и систем. *Практика применения методов* [Analysis of methods for assessing the

* Received 06 February 2025.

reliability of equipment and systems. Practice of methods]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 2008, vol. 30, no. 3, pp. 99–120. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-8.

5. Nalimov V.V., Golikova T.I. *Logicheskie osnovaniya planirovaniya eksperimenta* [Logical foundations of experiment planning]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 151 p.

6. Osintseva E.A., Chimitova E.V. Analiz nadezhnosti tabletpressa GZP-32 na osnove vinerovskoi degradatsionnoi modeli [The problem of reliability analysis of the GZP-32 Tablet Press]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii*. V 8 ch. Ch. 1 [Science. Technology. Innovation. In 8 pt. Pt. 1]. Novosibirsk, 2025, pp. 170–177.

7. Guan Q., Tang Y.C., Xu A.C. Objective Bayesian analysis accelerated degradation test based on wiener process model. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, vol. 40 (4), pp. 2743–2755.

8. Ye Z.-S., Chen N., Shen Y. A new class of Wiener process models for degradation analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, vol. 139, pp. 58–67.

9. Chimitova E.V., Osintseva E.A. Optimal design of reliability experiment based on the Wiener degradation model with covariates. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2022, no. 59, pp. 23–33. DOI: 10.17223/19988605/59/3.

10. Osintseva E., Chimitova E. Optimal design of reliability experiment based on the Wiener degradation model under limitation for the degradation index. *Engineering Proceedings*, 2023, vol. 33 (1), p. 64. DOI: 10.3390/engproc2023033064.

11. Osintseva E.A., Chimitova E.V. Optimal'noe planirovanie eksperimenta na osnove vinerovskoi degradatsionnoi modeli s kovariatami s ispol'zovaniem uslovnoi informatsionnoi matritsy Fishera [Optimal design of experiment based on the Wiener degradation model with covariate using conditional Fisher information matrix]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2024, no. 67, pp. 9–19. DOI: 10.17223/19988605/67/9.

12. Pan D., Liu J.B., Cao J. Remaining useful life estimation using an inverse Gaussian degradation model. *Neurocomputing*, 2016, vol. 185, pp. 64–72.

13. Chetvertakova E.S., Chimitova E.V. The Wiener degradation model with random effects in reliability metrology. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI*. Glasgow, World Scientific, 2018, pp. 162–169.

14. Li S., Chen Z., Liu Q., Shi W., Li K. Modeling and analysis of performance degradation data for reliability assessment: A review. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 74648–74678. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2987332.

15. Osintseva E.A. [Investigation of maximum likelihood estimator properties for parameters of Wiener degradation models]. *Molodezh'. Nauka. Innovatsii*. T. 1 [Youth. Science. Innovations. Vol. 1]. Collection of reports. Vladivostok, 2016, pp. 151–156. (In Russian).

Для цитирования:

Осинцева Е.А., Заремба В.В. Анализ надежности таблетпресса GZP-32 на основе винеровской деградационной модели // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 3 (99). – С. 83–98. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-83-98.

For citation:

Osintseva E.A., Zarembo V.V. Analiz nadezhnosti tabletpressa GZP-32 na osnove vinerovskoi degradatsionnoi modeli [The problem of reliability analysis of the tablet press GZP-32 based on the Wiener degradation model]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2025, no. 3 (99), pp. 83–98. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-83-98.