

А.В. Бондар¹, Г.О. Шумілін¹, Р.Г. Агамова¹, І.М. Туленко²

¹ Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

² Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ФОРМУВАННІ ЗМІЦНЮВАЛЬНИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

У статті наведено модель технологічного процесу зміцнення та відновлення конструктивних елементів силових установок літальних апаратів. Вибір оптимальних режимів нанесення зміцнювальних захисних покриттів розглядається як багатокритерійний з урахуванням критеріїв міцності, а також якісних характеристик покриттів.

Технологічний процес дуже складний та важливий, тому при побудові математичної моделі технологічного процесу зазвичай обмежуються схематичним уявленням об'єкту дослідження.

Особливістю описаної технології отримання інформації є те, що в ній вдалося позбутися двох головних недоліків класичної теорії планування експерименту та регресійного аналізу, які обмежують використання цих інструментів – моделей планування та обробки заданої структури й обов'язкове використання площі типового планування.

Ключові слова: планування експерименту, математична модель, технологічний процес, багатокритерійна, захисне покриття.

Вступ

Постановка проблеми. При розробці технологічного процесу неминуче доводиться вирішувати оптимізаційні задачі щодо створення на поверхні деталей, що виготовляються, зміцнювальних захисних покриттів. Це пояснюється тим, що велика кількість технологічних параметрів у поєднанні з широкою номенклатурою матеріалів, з яких формують покриття, надають технологам безліч альтернативних варіантів. У такій ситуації ефективність прийнятих рішень буде залежати від наявності необхідного критерію оцінки працездатності (довговічності) покриттів при заданих умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз робіт щодо оптимізації технологічних процесів нанесення зміцнювальних захисних покриттів показує, що в більшості робіт покриття оптимізується за одним критерієм [1, с. 124...131; 2, с. 22]. Такий підхід приводить до спрощення задачі та зміни її сутності. Тому в даній роботі задача вибору оптимальних режимів нанесення зміцнювальних захисних покриттів розглядається як багатокритерійна, з урахуванням критеріїв міцності, а також якісних характеристик покриттів.

Мета статті полягає в обґрунтуванні застосування математичної моделі технологічного процесу нанесенням зміцнювальних захисних покриттів з метою визначення придатності їх до застосування на виробі авіаційної техніки державної авіації.

Виклад основного матеріалу

Для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом зміцнення й відновлення конструктивних елементів (об'єктом дослідження) необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, і представити їх у кількісній формі – у вигляді математичної моделі. Модель дає змогу отримати інформацію про процес, який протікає в об'єкті; розрахувати характеристики об'єкту; отримати інформацію, яку можна використовувати для управління об'єктом, що моделюється [1, с. 124...131].

Реальний технологічний процес дуже складний, а явища, що його супроводжують, надзвичайно різноманітні. Тому при побудові математичної моделі технологічного процесу зазвичай обмежуються схематичним (спрощеним) уявленням об'єкту дослідження у вигляді „чорного ящика” (рис. 1), в основі якого лежить ідея Н. Вінера [3, с. 23].

Група $z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$, що включає в себе контролюючі фактори, які на відміну від факторів першої групи не допускають цілеспрямованої зміни в ході дослідження.

Група $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, яка включає в себе змінні, які часто називаються вихідними. До їх числа відносяться величини, які характеризують ефективність процесу, техніко-економічні параметри, технологічні властивості, а також характеристики готових продуктів.

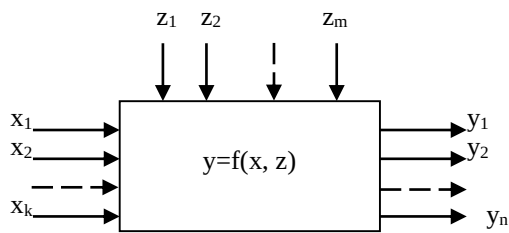


Рис. 1. Структурна схема об'єкту досліджень:
 $y = f(x, z)$ – функція відгуку; $x_1, x_2, \dots, x_k$ – вхідні фактори, що регулюються; $z_1, z_2, \dots, z_m$ – вхідні фактори, що не регулюються; $y_1, y_2, \dots, y_n$ – фактори змінної, що контролюються (критерії оптимізації).

Джерело: [3, с. 23].

Залежність між вихідними параметрами (відгуку) та вхідними параметрами (фактори) називаються функцією відгуку, що має такий вигляд: [2, с. 15]:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k), \quad (1)$$

де Y – відгук (результат експерименту); $X_1, X_2, \dots, X_k$ – незалежні змінні (фактори), якими можна варіювати при постановці експерименту.

При досить обмежених знаннях про механізм технологічного процесу, аналітичний вираз функції відгуку невідомий. Тому доводиться обмежитись представленням функції відгуку поліномом [4, с. 15]:

$$Y^* = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<l} b_{ijl} x_i x_j x_l, \quad (2)$$

де Y^* – розрахункове значення параметру оптимізації; b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – вибіркові коефіцієнти, які можна отримати методами регресивного аналізу, використовуючи результати експерименту.

Розрахунок коефіцієнтів математичної моделі проводиться за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u}{n}, \quad (3)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u \bar{X}_{iu}}{n}, \quad (4)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{X}_{iu} \bar{X}_{ju} \bar{Y}_u}{n}. \quad (5)$$

Отримане емпіричним шляхом рівняння (2) часто називають математичною моделлю процесу.

Для прийняття рішення про застосування моделі необхідна комплексна оцінка, яка дасть змогу оцінити статистичні та споживчі властивості моделі в повному обсязі. Обов'язково необхідно перевірити інформативність, адекватність, стійкість моделі [4, с. 24]. Бажано також аналізувати властивості моделі, які передбачаються.

Оцінкою інформативності слугує величина множинного коефіцієнта корекції R (коефіцієнт корекції між експериментальним значенням відгуку та значенням відгуку, який розрахований за модулем). Чим ближче він до одиниці, тим інформативність модуля вище. Величина R^2 представляє собою долю загальної суми квадратів:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}, \quad (6)$$

де N – число експерименту; $\hat{Y}_i$ – значення відгуку в i -му експерименті; $\bar{Y}_i$ – середнє значення в i -му експерименті; $\bar{Y}$ – загальне середнє.

Це значення повинно бути якнайближче до одиниці. Емпірично встановлено, що для активного експерименту воно повинно бути не менше 0,96...0,97. Але це недостатні умови. Достатньою умовою є перевірка значимості коефіцієнта корекції за критерієм Фішера:

$$F_R = \frac{S_R^2}{S_{\text{зал.}}^2} > F_{\alpha, V_R, V_{\text{зал.}}}, \quad (7)$$

де $S_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{(k-1)}$ – дисперсія, яка пояснюється

моделлю; $S_{\text{зал.}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2}{(N-k)}$ – залишкова дисперсія,

де $\hat{Y}_i$ – значення відгуку в i -му експерименті, $\bar{Y}_i$ – середнє значення в i -му експерименті, $\bar{Y}$ – загальне середнє, N – число експерименту, k – число членів моделі; $V_R, V_{\text{зал.}}$ – ступінь свободи для дисперсії, яка пояснює модель та залишкову дисперсію.

Якщо розрахункове значення більше табличного із заданим рівнем значимості, то модель інформативна. Така перевірка інформативності є якісною.

Перевірка адекватності зводиться до перевірки за критерієм Фішера при належності дисперсії відтворюваності і залишкової дисперсії до однієї генеральної сукупності. Позитивний звіт (F – табличне менше F – розрахункового) – модель вважається адекватною з заданим рівнем значимості і, при цьому, розходження дисперсій статистично незначне [4, с. 56; 5, с. 14].

Розрахункове значення критерію визначається за формулою:

$$F_{\text{роз.}} = \frac{S_{ad}^2}{S^2}, \quad (8)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності,

$$S_{ao}^2 = \frac{n}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (9)$$

де l – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Табличне значення критерію адекватності вибирається при ступені свободи чисельника $f_1 = N-l$, знаменника $f_2 = N(n-1)$ та рівня значимості α ($\alpha = 0,05$).

Якщо $F_{роз} \leq F_{табл}$, то можна ймовірно вважати, що модель адекватно описує процес, який досліджується. У протилежному випадку – модель неадекватна й потрібні неформальні дії для одержання адекватної моделі. Для цього можна перейти від лінійної моделі до моделі, в якій враховується нелінійність:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (10)$$

а потім до моделі другого порядку

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^2. \quad (11)$$

Про стійкість можна говорити в двох змістах:

1. Стійкість структури рівняння регресії.
2. Стійкість оцінок коефіцієнтів регресії.

Ці стійкості прямо залежать від якості матриці експерименту та алгоритмів обробки даних [6, с. 24...27].

При аналізі стійкості розглядається таблиця мультиколінеальності й число обумовленості. Ця таблиця дає змогу проаналізувати стійкість структури рівняння регресії.

При цьому необхідно виконати такі умови:

1. Максимальний коефіцієнт парної кореляції між регресорами не повинен перевищувати абсолютної величини 0,3...0,4.

2. Коефіцієнт парної кореляції з відгуком по абсолютній величині повинен бути більше, ніж максимальний коефіцієнт кореляції з іншим регресором.

3. При виконанні цих умов можна бути впевненим у стійкості структури рівнянь регресії [4, с. 96; 6, с. 24...27].

Якість складного об'єкту оцінюють за результатами його дослідження (проведення експерименту). Для забезпечення необхідної вірогідності та об'єктивності одержуваних оцінок, експеримент повинен проводитись в умовах, максимально наближених до тих, у яких об'єкт буде функціонувати. При цьому критерій оцінки його якості повинен містити такі вимоги до об'єкта, які забезпечать виконання поставленої перед ним задачі.

Для прийняття рішення про застосування моделі необхідна комплексна оцінка, яка дасть

змогу оцінити властивості моделі в повному обсязі.

Модель дає змогу:

одержати інформацію про процеси, що протікають в об'єкті;

розрахувати характеристики об'єкта, тобто – аналізувати та проєктувати їх;

одержати інформацію, яку можна використовувати для керування моделюючим об'єктом.

Таким чином, при побудові математичної моделі, технолог може тільки назвати параметри, що визначають умови протікання процесу. У цих умовах доцільне використання ідеї “чорного ящика”, що є об'єктом дослідження.

Розрахунковий експеримент – це експеримент, в якому замість фізичного об'єкта використовують математичну модель.

До розрахункового експерименту відносяться такі функції:

пошук оптимальних умов;

багатопараметрична оптимізація;

обчислення значення функції по моделі;

графічне дослідження рівнянь регресії;

графічне дослідження поверхонь відгуку.

Для пошуку оптимальних умов вибрано метод випадкового пошуку.

Метод випадкового пошуку набув поширення як метод оптимізації складних технологічних і технічних систем, обчислювальних задач, проєктування систем різного виду. Його використовують у спеціальних автоматах, які мають назву “багатоканальні статистичні оптимізатори” [7, с. 9].

Ефективність випадкового пошуку істотно залежить від “рівномірності” розподілу випадкових точок у багатовимірному одиничному кубі, а отже, у фактичному просторі. Найкращі серед відомих на цей час рівномірно розподілених послідовностей – це ЛПТ – послідовності, математичний апарат яких розробив І.М. Соболев [8, с. 74; 9, с. 15].

ЛПТ – послідовності знайшли значне застосування під час розв'язання задач оптимального проєктування. Останнім часом ЛПТ – послідовності використовуються для побудови ефективних планів експерименту [10, с. 134].

Причинами такого вибору є:

даний метод дає змогу знайти глобальний екстремум, а не локальний, як всі інші методи;

з ростом числа ітерацій він сходиться, що в інших методах не гарантовано;

його ефективність не залежить від форми поверхні відгуку;

на функцію не накладаються ніякі обмеження, крім можливості її обчислення.

Під час проведення багатопараметричної оптимізації постає проблема вибору важливості

критеріїв оптимізації, призначення їм рангів та вагових коефіцієнтів. Це пов'язане з тим, що згідно з реальною постановою задачі оптимізації вплив конкретного критерія оптимізації на ті оптимальні значення, які шукаємо, може бути різним (більш або менш сильним).

Величина вагових коефіцієнтів може значно впливати на результати багатопараметричної оптимізації.

Вагові коефіцієнти критеріїв оптимізації призначаються за допомогою експертів, що являє собою значне обговорення тільки з різницею, що свої оцінки експерти висловлюють числовою формою. При безпосередньому призначенні вагових коефіцієнтів кожен експерт оцінює важливість критеріїв оптимізації в порівнянні їх між собою. При цьому потрібно зазначити, що сума вагових коефіцієнтів критеріїв оптимізації, призначених одним експертом, має дорівнювати одиниці. Після того як експерти оцінять вагові коефіцієнти, потрібно у відповідний спосіб обробити одержані результати експертних оцінок на предмет їх узгодженості.

Після визначення вагових коефіцієнтів проводиться обробка одержаних результатів на предмет їх узгодженості.

Визначення рангів проводилося за формулою:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} M_i}{n_i}, \quad (12)$$

де M_i – місце значимості i -го показника; n_i – кількість експертів в оцінці даного показника.

Вагові коефіцієнти визначалися за формулою:

$$K_i = 1 - \frac{P_i - P_{i\min}}{m - 1} \cdot d, \quad (13)$$

де P_i – ранг поточного i -го показника; $P_{i\min}$ – ранг i -го показника, що має найважливіше значення; m – кількість показників; d – діапазон зміни вагових коефіцієнтів показників (0,5...1); K_i – ваговий коефіцієнт i -го показника.

Для перевірки узгодженості експертів розроблено спеціальну методику, яка використовує для цієї мети коефіцієнт конкордації, запропонований Кендалом [11, с. 182]:

$$W = \frac{12}{m^2(n^3 - n)} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m R_{ij} - \frac{n+1}{2} \right)^2, \quad (14)$$

де n – кількість параметрів, що оцінюють експерти; m – кількість експертів; R_{ij} – ранг j -го об'єкта, призначений йому i -м експертом.

Під час розв'язання задачі провести натурний експеримент у всіх точках факторного простору не завжди можливо, бо є обмеження в ресурсах і часі. У зв'язку з цим для пошуку найоптимальнішої точки на основі експериментальних даних будують багатфакторні математичні моделі критеріїв

оптимізації та проводять багатопараметричну оптимізацію (за Парето) за цими модулями.

При оптимізації за модулями найчастіше використовують алгоритм випадкового пошуку на основі ЛПТ, рівномірно розподілених випадкових точок. Алгоритм пошуку оптимальної точки у фактичному просторі має такий вигляд [12, с. 34]:

Крок 1. Розрахунок значень критеріїв за моделями на основі одержаної матриці натуральних значень.

Крок 2. Розрахунок узагальненого критерію оптимізації $y_{узг}$.

$$y_{узг} = \sqrt{\sum_{j=1}^m [1 - D_{jr}]^2 \cdot W_j^2}, \quad (15)$$

де $y_{узг}$ – значення узагальненої цільової функції для r -го досліду експерименту, яка у випадку пошуку оптимальних умов прагне до 0 ($y_{узг} \rightarrow 0$)

і є оцінкою близькості цієї точки до гіпотетичного оптимального значення, що дорівнює 1; D_{jr} – зведене до інтервалу 0...1 значення j -го відгуку (критерію оптимізації) у r -му досліді експерименту, залежно від обраної для певного критерію оптимізації мети це значення обчислюється за різними формулами; W_j – вага j -го критерію оптимізації (відгуку); m – кількість критеріїв якості (відгуків).

Значення D_{jr} обчислюють за допомогою формул [13, с. 28...38]:

а) метою j -го критерію оптимізації (відгуку) є МАКСИМУМ

$$D_{jr} = 1 - \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}, \quad (16)$$

де $y_{j\max}$ і $y_{j\min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення j -го критерію якості (відгуку) серед N дослідів (пробних точок);

б) метою j -го критерію оптимізації (відгуку) є МІНІМУМ

$$D_{jr} = 1 + \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}. \quad (17)$$

Крок 3. Пошук найменшого значення, обчисленого у кожній пробній точці узагальненого критерію оптимізації, якому відповідає максимальне значення $y_{ефект}$ ($y_{ефект} = 1 - y_{узг}$).

Точка факторного простору, якій відповідає найменше значення узагальненого критерію оптимізації, є оптимальною, а відповідний рядок з матриці натуральних значень є оптимальним значенням параметрів (факторів), що впливають на технологічний процес.

У зв'язку з тим, що одержання математичних моделей критеріїв якості, а також розрахунок за цими моделями значень критеріїв якості у пробних точках є трудомістким, то для цієї мети

використовують Пакет прикладних програм планування, регресії і аналізу моделі (ППП ПРІАМ).

Результати повторних досліджень, проведених у номінально однакових умовах, перевірялися на статичну відтворюваність за G -критерієм Кохрена, при $G_{\text{розр}} \leq G_{\text{табл}}$.

Регресійний аналіз результатів досліджень і перевірку одержаних математичних моделей виконують за алгоритмом і відповідно до методики, викладеної в [10, с. 198; 14, с. 46]. Розрахунок моделей здійснювався на персональному комп'ютері з використанням ППП ПРІАМ. За результатами, одержаними за допомогою ППП ПРІАМ, отримуємо моделі: y_1, y_2 .

Кількість критеріїв оптимізації більше, ніж один, то їх спільні значення вибирають, використовуючи принцип компромісу за Парето [8, с. 86]:

$Y = [x_1, x_2, \dots, x_n] = Y[y_1 = \min; y_2 = \max] \text{ opt}$, де Y – узагальнений критерій оптимальності об'єкта оптимізації, одержаний шляхом використання принципу компромісу за Парето.

Ідея компромісу за Парето полягає в пошуку таких умов функціонування систем, за якими узагальнений критерій оптимальності досягає екстремального значення.

Узагальнений критерій оптимальності:

$$Y = f[y_1 \text{ cm}, y_2 \text{ cm}, \dots, y_n \text{ cm}] = \text{extr},$$

де $y_1 \text{ cm}, y_2 \text{ cm}, \dots, y_n \text{ cm}$ – стандартизовані значення критеріїв якості.

Компромід за Парето виконується для такої точки, відстань від якої до зазначеної вершини буде мінімальною.

При використанні графоаналітичного методу визначаємо оптимальні точки (критерії оптимізації), за якими проводимо багатопараметричну оптимізацію. Тоді будується цільова функція [15, с. 184], яка має вигляд:

$$y_{\text{узаг. r}} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (1 - D_{jr})^2 \cdot W_j^2}, \quad (18)$$

де $y_{\text{узаг. r}}$ – значення узагальненої цільової функції для r -го дослідження експерименту, яка у випадку оптимуму прагне до 0 і є оцінкою близькості цієї точки до гіпотетичного оптимального значення, що дорівнює 1; D_{jr} – зведене до інтервалу 0...1 значення j -го відгуку (критерії якості) у r -му дослідженні експерименту, залежно від обраної для певного критерію якості мети, це значення обчислюють за різними формулами; W_j – вага j -го критерію оптимізації (відгуку); m – кількість критеріїв оптимізації (відгуків).

Значення D_{jr} обчислюють за допомогою таких формул [15, с. 188]:

а) метою j -го критерію якості (відгуку) є МАКСИМУМ

$$D_{jr} = 1 - \frac{y_{j \max} - y_{jr}}{y_{j \max} - y_{j \min}}, \quad (19)$$

де $y_{j \max}$ і $y_{j \min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення j -го критерію якості (відгуку) серед N досліджень (пробних точок);

б) метою j -го критерію якості (відгуку) є МІНІМУМ

$$D_{jr} = 1 - \frac{y_{j \min} - y_{jr}}{y_{j \max} - y_{j \min}}, \quad (20)$$

де $y_{j \max}$ і $y_{j \min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення j -го критерію якості (відгуку) серед N досліджень (пробних точок).

У деяких випадках обчислюють ефективність одержаного оптимального значення за формулою:

$$y_{\text{ефект}} = 1 - y_{\text{узаг}}, \quad (21)$$

де $y_{\text{узаг}}$ – значення узагальненої цільової функції.

Висновки

Таким чином, при пошуку оптимальних режимів нанесення зміцнювальних захисних покриттів, вирішуючи задачу багатопараметричної оптимізації, можна зіткнутись зі складною ситуацією, коли об'єкт характеризується не одним, а кількома показниками функціонування. При оптимізації вимоги до них можуть бути достатньо суперечливі, тобто покращуючи один показник, ми погіршуємо частину інших.

Для рішення даної задачі була використана відповідна функція ППП ПРІАМ. Проведення моделювання при зміні рейтингу дасть змогу визначити оптимальні умови даного рейтингу при обмеженні витрат на зміну параметрів. Після чого видається результат цього моделювання.

Моделювання дає змогу отримати інформацію про технологічний процес, можливість використання його для управління об'єктом, який моделюється та розрахувати характеристики цього об'єкта.

Проведення практичних розрахунків характеристик зміцнення та відновлення конструктивних елементів силових установок літальних апаратів на основі запропонованої моделі технологічного процесу буде **напрямом подальших досліджень**.

Список літератури

1. Костенко О. Оптимізація планів експериментів в умовах обмежених матеріальних та часових ресурсів, Вісник Полтавської державної аграрної академії, №3, 2015. – С. 124–131.
2. Лапач С. Теорія планування експериментів./КПІ ім. Ігоря Сікорського, під ред. С.Г. Радченко, 2020. – 86 с.
3. Булашенко А. Основи наукових досліджень. – Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, 2011.- 94 с.
4. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. – К.: ЗАО “Укрспецмонтажпроект”, 1998. – 274 с.
5. Барабашук В.И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике. – К.: Техніка, 1984. – 200 с.
6. Каталог. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ / НТУ КПИ; Под ред. Лапач С.Н., Радченко С.Г., Бабич П.Н.–К.: СП “Текпор”, 1993. – С.24–27.
7. Новицький І., Ус С. Випадкові процеси. – Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, /НГУ під ред. Зеленцов Д., Ламзюк В., 2011. – 125 с.
8. Соболев И.М. Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 111 с.
9. Соболев И.М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб. – М.: Знание, 1985. – 32 с.
10. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. – К.: ЗАО “Укрспецмонтажпроект”, 1998. – 274 с.
11. Лапач С.Н., Губенко А.В., Бабич П.Н. Статистические методы в медико-биологических исследованиях с использованием Excel. – К.: МОРИОН, 2000. –320 с.
12. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: Навч.-метод. посіб. – К.: ІВЦ “Політехніка”, 2001. – 88 с.
13. Шмырев В.Ф., Кондращенко В.Я., Радченко С.Г. Метод оптимизации массовых характеристик воздушных распределительных сетей бортовых энергетических систем // Зб. наук. праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці. – К.: Світ, 1998. – Вип. 4. – С. 28-38.
14. Радченко С.Г., Добрянський С.С. Методические рекомендации по самостоятельному изучению дисциплины “Основы научных исследований и технического творчества”, “Оптимизация и моделирование технологических процессов и объектов в машиностроении” для студентов специальности “Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты” и слушателей ФКС. – К.: КПИ, 1987. – 68 с.
15. Лапач С.Н., Пасечник М.Ф., Чубенко А.В. Статистические методы в фармакологии и маркетинге фармацевтического рынка. – К.: ЗАТ “Укрспецмонтажпроект”, 1999. – 312 с.

Надійшла до редколегії 28.09.2023

Схвалена до друку 10.11.2023

Відомості про авторів:

Бондар Андрій Васильович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3350-4331>

Шумілін Геннадій Олександрович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6974-3692>

Агамова Раїса Геннадіївна

молодший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9723-2988>

Туленко Ігор Михайлович

начальник навчально-лабораторного комплексу
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-2847-483X>

Information about the authors:

Andrei Bondar

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3350-4331>

Hennadii Shumilin

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6974-3692>

Raisa Ahamova

Junior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9723-2988>

Ihor Tulenko

Head of the Educational and Laboratory Complex
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-2847-483X>

**PLANNING OF EXPERIMENTAL RESEARCH IN THE FORMATION OF REINFORCING
PROTECTIVE COATINGS ACCORDING TO THE RESULTS OF THE EXPERIMENT**

A. Bondar, H. Shumilin, R. Ahamova, I. Tulenko

When developing a technological process, it is inevitable to solve optimization problems related to the creation of reinforcing protective coatings on the surface of parts. This is explained by the fact that a large number of technological parameters in combination with a wide range of materials from which the coating is formed provide technologists with many alternative options. In such a situation, the effectiveness of the adopted decisions will depend on the presence of the necessary criterion for assessing the performance (durability) of the coatings under the specified operating conditions.

The analysis of works on the optimization of technological processes of application of strengthening protective coatings shows that in most works the coating is optimized according to one criterion. But such an approach leads to a simplification of the task and a change in its essence. Therefore, in this work, the task of choosing optimal modes of application of strengthening protective coatings is considered as a multi-criteria one, taking into account strength criteria, as well as quality characteristics of coatings.

The purpose of the article is to choose the optimal modes of application of reinforcing protective coatings, which is considered multi-criteria, taking into account strength criteria, as well as quality characteristics of coatings.

The peculiarity of the described technology of obtaining information is that it managed to get rid of the two main shortcomings of the classical theory of experiment planning and regression analysis, which limit the use of these tools - planning and processing models of a pre-determined structure and the mandatory use of a standard planning area.

Keywords: experiment planning, mathematical model, technological process, multi-criteria, protective coating.