

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

---

УДК 676:628.1.3

**ПЛОСКОНОС В. Г., к.т.н., доцент**  
**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

### **НОВІ ТЕНДЕНЦІЇ В МЕТОДОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КАРТОННО-ПАПЕРОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

*Розроблено методологію, яка дозволяє передбачити значення параметрів оптимізації у станах (точках факторного простору), що не досліджувалися в процесі проведення експерименту. Моделювання відбувається на базі комплексу адекватних математичних моделей, які створені на основі попередньо проведених експериментальних досліджень. Моделюванню піддаються процеси екстракції водорозчинних органічних речовин із волокнистих напівфабрикатів в процесах виробництва паперу та картону з мінімальним споживанням свіжої води.*

**Ключові слова:** методологія, математичні моделі, адекватність моделей, моделювання, виробництво паперу та картону, органічні водорозчинні речовини.

**DOI: 10.20535/2617-9741.1.2020.207970**

© Плосконос В. Г., 2020.

#### **Постановка задачі**

Для аналітика експеримент є найважливішим етапом багатьох фундаментальних і прикладних досліджень. Зазвичай, щоб максимально вивчити об'єкт та дізнатися про комплекс його властивостей, потрібно його дослідити, а саме: провести експериментальні дослідження та зафіксувати результати цих досліджень на носіях інформації. Це необхідно з метою порівняння досягнутого рівня пізнання об'єкта з тим, який склався у дослідника в процесі літературних та патентних пошуків, а в подальшому для використання знань, здобутих в ході проведення експериментальних досліджень, в практичних цілях. Адже в цьому і полягає основна задача наукового пошуку. В свою чергу, ефективність експериментальних досліджень багато в чому залежить від методології, яка використовується в процесі проведення наукових пошуків.

#### **Аналіз попередніх досліджень**

Як показує аналіз попередніх досліджень, виробництво напівфабрикатів, паперу та картону відноситься до класу складних технологічних систем [1,2]. Дослідження та вивчення таких систем потребує спеціального підходу, зважаючи на їх особливість. Необхідно акцентувати увагу дослідника мінімум на трьох аспектах проведення пошукових робіт, на яких можливо значно зекономити час і матеріальні ресурси і, разом з тим, отримати бажані результати.

Якщо мова йде про перший аспект, то на цьому етапі потрібно звернути увагу на наступне. Дослідження стану технологічних систем виробництва напівфабрикатів, паперу та картону показує, що на окремі блоки таких технологічних систем, а отже і на всю в цілому технологічну систему впливає маса незалежних детермінованих величин, які називаються факторами [1,2]. Ці фактори проявляють свій вплив на кожному із етапів виробництва, а саме: в процесі підготовки маси, включаючи стадії розпуску, очищення, розмелювання; складання композиції; відливання; пресування, сушіння полотна. Адже, виробництво паперу чи картону – це послідовність взаємопов'язаних процесів, від ефективності функціонування яких, в кінцевому варіанті, залежить якість продукції, що виготовляється. Разом з тим, кількість факторів, які проявляють свою силу впливу, може бути практично необмеженою. А це змушує дослідника збільшувати обсяг експериментальних досліджень і призводить до значних матеріальних витрат на їх проведення.

Питанню відсіювання факторів, які можуть бути віднесені до групи незначимих, буде приділена увага у викладках даної статті.

На другому етапі досліджень важливим аспектом є досягнення максимальної інформативності експерименту [3]. Як відомо, в ході проведення експериментальних досліджень об'єкт, який досліджується, по-різному реагує на зміну факторів (одного або декількох одночасно) і, таким чином, проявляє свій комплекс властивостей. Задача, яка стоїть перед дослідником – це так спланувати проведення експериментальних досліджень, щоб об'єкт в процесі його дослідження максимально проявив весь свій комплекс властивостей, незалежно від внутрішньої структури досліджуваного об'єкта (яку ми з часом відобразимо у вигляді математичної моделі), а також впливовості тих або інших факторів. Таким чином, забезпечується максимальна достовірність результатів експериментальних досліджень в умовах випадкових "шумових" перешкод [3].

Класичним (не тому що він є класикою, а тому, що його в основному використовують) вважається підхід до проведення експериментальних досліджень, за якого стан досліджуваного об'єкта (а, відповідно і інформативність) поступово змінюється і фіксується під впливом лише одного із факторів, що були відібрані експериментатором в якості впливових. Зміна кожного із факторів відбувається по черзі (на фоні зафіксованих значень інших факторів). Деякі експериментатори вважають, що таким чином легше прослідкувати, як змінюється відгук досліджуваного об'єкта і зафіксувати надану інформацію у вигляді графіків (діаграм). Але такий підхід до добування інформації стосовно досліджуваного об'єкта багато в чому хибний, адже може виявитися, що фактор за попередніми дослідами був включений до експерименту, але він не виявив суттєвого впливу на вихідний показник.

Ефективним вирішенням цієї проблеми є використання комп'ютерних технологій для розробки плану (матриці) експериментальних досліджень з подальшим створенням адекватних математичних моделей, які придатні для цілей моделювання [3]. Разом з тим, враховуючи, що в процесі роботи програмного комплексу розробляється декілька рівноцінних планів експерименту [3], перед експериментатором постає задача відібрати єдиний план експерименту. Вирішенню цього питання буде приділена увага у подальших викладках даної статті.

Наступним (третім) аспектом, на який потрібно звернути особливу увагу в процесі проведення наукових досліджень, є розроблення адекватної математичної моделі та використання її з метою подальшого дослідження об'єкту, тобто з метою моделювання.

Математичне комп'ютерне моделювання на сьогоднішній день стало одним із головних засобів дослідження складних процесів і систем, до яких відносяться системи виробництва паперу та картону, особливо в умовах мінімального споживання свіжої води на виробничі потреби. На моделюванні базуються сучасні підходи до проектування, оптимізації та управління в різних галузях науки і техніки. Як відомо, мета процесу моделювання - це здобуття, обробка та використання інформації стосовно об'єктів, які взаємодіють між собою і зовнішнім середовищем. Модель в даній ситуації виступає як засіб пізнання властивостей і закономірностей поведінки об'єкта [1,2].

Головна і важлива умова, за якої можливо перейти від процесу дослідження самого об'єкта до дослідження математичної моделі, - це вимога адекватності математичної моделі по відношенню до об'єкта. За виконання цієї умови можливий подальший перехід до перенесення результатів моделювання на об'єкт дослідження. Адекватність – це можливість відтворення математичною моделлю з заданою повнотою всіх властивостей досліджуваного об'єкта, які є важливими в процесі даного дослідження. Як правило, адекватність моделі визначається на підставі статистичних оцінок розбіжностей значень вихідних параметрів моделі та об'єкту, що досліджується, за однакових значеннях вхідних факторів, розрахованих за результатами серії експериментів на об'єкті моделювання [1,2]. Для перевірки адекватності моделі можуть використовуватися дані іншої серії експериментів, ніж для параметричної ідентифікації. Таким чином, математична модель створюється з метою вирішення конкретних завдань і, в даному випадку, розробник моделі має бути впевненим, що він не отримає в процесі моделювання абсурдних результатів. Дослідник повинен бути переконаний, що всі отримані в процесі моделювання результати, відобразатимуть необхідні для нього характеристики та властивості модельованої системи.

У загальному в процесі розробки математичної моделі потрібно враховувати такі вимоги:

- змістовність моделі, тобто здатність її відображати істотні риси і властивості процесу, який вивчається і моделюється;

- дедуктивність математичної моделі, тобто можливість конструктивного використання її з метою отримання бажаного для дослідника результату;

- індуктивність моделі – вивчення причин і наслідків, від окремого до загального, з метою накопичення необхідних для дослідника знань.

Модель повинна дати можливість знайти відповіді на певні запитання, які виникають у дослідника, оскільки вони були поставлені з метою глибокого вивчення і вирішення проблеми. Зазвичай, ступінь деталізації математичної моделі слід вибирати, орієнтуючись на цілі, що поставлені в процесі моделювання, з урахуванням наявних ресурсів для створення моделі.

Найбільш прогресивним методом, який використовується для розробки математичних моделей на базі експериментальних досліджень, є метод групового урахування аргументів (МГУА), який базується на деяких принципах теорії навчання та самоорганізації, а саме: на принципах "селекції", або спрямованого відбору [4]. Вирішенню питання використання створених адекватних моделей [4] з метою моделювання, буде приділена увага у подальших викладках даної статті.

Таким чином, **невирішеною частиною проблеми** з практичної точки зору є відсутність відповідної методології. Отже, впровадження нових тенденцій в методологію дослідження стану складних систем картонно-паперового виробництва і є головною **метою даної статті**.

#### **Виклад основного матеріалу**

Повертаючись до першого аспекту проведення пошукових робіт, необхідно сказати, що з метою усунення зазначених вище труднощів, що виникають на етапі попереднього дослідження технологічної системи, експериментатору рекомендується провести попереднє оцінювання сили впливу кожного із факторів, які виявлені в ході літературних та патентних пошуків, і сформувати на цій основі групу найістотніших факторів. В подальшому ці фактори будуть задіяні на наступних етапах експериментальних досліджень. Разом з тим, інтуїтивний добір істотних факторів досить суб'єктивний і може призвести до помилкових висновків за результатами аналізу результатів досліджень. Тому на етапі попереднього дослідження рекомендовано використовувати статистичні методи відбору факторів, а саме: методи експертних оцінок. Ці методи ґрунтуються на статистичній обробці даних, отриманих у результаті опитування спеціалістів в даній галузі знань або аналізу наукових досліджень. Експертні оцінки формуються на основі результатів найновіших та ще не опублікованих наукових праць, які виконані кожним із експертів.

Незважаючи на їхню суб'єктивність, експертні оцінки містять корисну об'єктивну інформацію. Ця інформація дає можливість оцінити силу впливу кожного досліджуваного фактора. За застосування цього методу вважається, що думка групи експертів надійніша, ніж думка окремого експерта. Метод ґрунтується на тому, що невідома характеристика досліджуваного явища трактується як випадкова величина, а індивідуальна оцінка кожного експерта щодо істинності та значущості тієї чи іншої події є відображенням її закону розподілу.

Оскільки думка кожного спеціаліста має суб'єктивний характер, то ступінь узгодженості результатів ранжування групи експертів можливо оцінити коефіцієнтом конкордації, який розраховується за формулою:

$$W = \frac{12}{m^2(n^3 - n)},$$
$$0 \leq W \leq 1; \quad (1)$$

де:  $m$  – кількість експертів, які включені до анкети опитування;

$n$  – кількість факторів, які аналізуються.

Істотність значення  $W$  визначається за допомогою критерію  $\chi^2_w$ . Значення  $\chi^2_w$  порівнюється з табличним – таблиці  $\chi^2_w$  – розподілу (за заданого рівня значимості і числа ступенів свободи  $f=n-1$ ). За  $\chi^2_w > \chi^2(f)$  – ступінь узгодженості між дослідниками не визиває сумнівів.

Таким чином, використання методу експертних оцінок дозволяє експериментатору позбутися не значимих факторів і дещо скоротити обсяг експериментальних досліджень.

Повертаючись до другого етапу проведення досліджень, необхідно відмітити, що метод синтезу інформативних планів є двоетапним [3]:

1) на першому етапі за заданими параметрами плану ( $M$  – число факторів,  $N$  – число дослідів,  $K$  – число рівнів дискретизації) генерується  $F$  базисних варіантів, які задовольняють умові рівномірності покриття області зондування. Кількість базисних варіантів  $F$ , які генеруються на першому етапі, залежить від значень параметрів  $M, N, K$  і може змінюватися в межах від 1 до декількох сотень;

2) на другому етапі здійснюються багатокритеріальний аналіз базисних планів та локальні перетворення кожного з них з метою відбору найбільш прийняттого для реалізації за вимогою дослідника. Це і є другим аспектом методології.

Для одержання більш детальної інформації про властивості аналізованих планів можна вибрати один з них в якості опорного та проаналізувати локально пов'язані з ним варіанти за рахунок операцій інвертування і породження альтернатив [3].

Повертаючись до третього, і дуже важливого, аспекту методології наукових досліджень, необхідно відмітити, що розробка адекватних математичних моделей [4] створює сприятливе поле для моделювання та пошуку оптимальних умов за умови використання комп'ютерних технологій.

Враховуючи складність технологічних систем виробництва напівфабрикатів, паперу та картону, створено ряд адекватних математичних моделей, придатних для цілей моделювання [4], а саме:

- математична модель за показником масова концентрація водорозчинних органічних речовин:

$$Y_1 = - 273,82 + 1,06 \cdot 10^{-1} \cdot X_7 \cdot \ln(X_7) + 5,28 \cdot X_1 \cdot X_6 + 4,06 \cdot 10^2 \cdot X_3 \cdot \ln(X_2) + 1,05 \cdot 10^{-1} \cdot X_1^2 + 8,56 \cdot 10^{-2} \cdot X_7 \cdot \ln(X_8) + 6,04 \cdot 10^{-2} \cdot X_4 \cdot \ln(X_7) \quad (2)$$

- математична модель за показником біологічного споживання кисню (БСК<sub>5</sub>):

$$Y_2 = 33,08 + 6,2 \cdot X_1 \cdot X_3 + 4,41 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \cdot X_7 - 5,31 \cdot 10^1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 9,22 \cdot 10^{-2} \cdot X_2 \cdot X_7 + 6,29 \cdot 10^{-1} \cdot X_5 + 3,43 \cdot 10^{-2} \cdot X_6 \cdot X_7 \quad (3)$$

- математична модель за показником хімічного споживання кисню (ХСК):

$$Y_3 = - 772,45 + 1,14 \cdot X_7 + 6,15 \cdot 10^1 \cdot X_6 \cdot \ln(X_1) + 1,15 \cdot X_1 \cdot \ln(X_2) + 1,37 \cdot 10^2 \cdot X_3 \cdot \ln(X_5) + 6,58 \cdot \ln(X_4) \cdot \ln(X_5) + 2,38 \cdot 10^1 \cdot \ln^2(X_8). \quad (4)$$

Проведений аналіз моделі (2-4) показує, що відносна похибка відтворення масиву вихідних даних, за якими розроблено моделі, не перевищує 5%. Моделі показали практично одностайну збіжність на всіх експериментальних точках і це є переконливим доказом того, що отримані моделі можуть бути з використані з метою прогнозування за показниками  $Y_1 - Y_3$  як на початкових етапах функціонування технологічної системи виробництва напівфабрикатів, паперу та картону (за низької концентрації водорозчинних органічних речовин), так і в умовах високої їх концентрації (в технологічних системах, які наближені до замкнених) [4].

В процесі розробки математичних моделей в розрахунок взято наступні фактори [3], а саме:

- $X_1$  - вміст водорозчинних органічних речовин у волокнистій сировині, кг/т;
- $X_2$  - відношення показників  $X_{СК} \setminus B_{СК_5}$  у водній витяжці волокнистої сировини;
- $X_3$  - відношення показників  $B_{СК_5} \setminus \text{орг. частина}$  у водній витяжці волокнистої сировини;
- $X_4$  - температура зворотньої води для розбавлення маси, °С;
- $X_5$  - ступінь млива маси, °ШР;
- $X_6$  - масова доля волокна, %;
- $X_7$  - масова концентрація розчинних органічних речовин у зворотній воді, мг/л;
- $X_8$  - відношення показників  $X_{СК} \setminus B_{СК_5}$  у зворотній воді.

#### **Висновки**

З метою моделювання розроблено методологію дослідження стану складних технологічних систем виробництва паперу та картону, яка дозволяє передбачити значення параметрів оптимізації у станах (точках факторного простору), що не досліджувалися в процесі проведення експерименту. Моделювання має відбуватися на базі комплексу адекватних математичних моделей, які створені на основі попередньо проведених експериментальних досліджень [4]. Процесу моделюванню піддаються такі явища, як: екстракція водорозчинних органічних речовин із волокнистих напівфабрикатів в процесах виробництва паперу та картону з мінімальним споживанням свіжої води.

#### **Перспективи подальших досліджень**

Подальшими етапами дослідницької роботи є використання створених математичних моделей (2-4) для цілей моделювання. Поставлено задачу спрогнозувати рівні забруднення водопотоків складних технологічних систем виробництва паперу та картону водорозчинними органічними, а також мінеральними компонентами в умовах скорочення споживання свіжої води з 40 м<sup>3</sup>/т до 10 м<sup>3</sup>/т. Це дасть можливість визначитися з вихідними напівфабрикатами, комплексом допоміжних хімічних речовин, а також зі схемою використання зворотніх вод.

**Список використаної літератури**

1. Кикоть В.С., Плосконос В.Г. Идентификация характеристик сложных проектируемых систем с использованием самоорганизации и топологического метода анализа. Автоматика, 1986. №3, С. 34-42.
2. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. К.: "Техника", 1976. 311 с.
3. Плосконос В.Г. Використання комп'ютерних технологій в розробці планів експериментальних досліджень складних технологічних систем виробництва паперу та картону//Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", 2018. № 21(61). Т.3. С.50-54. DOI: 10.25313/2520-2057-2018-21-4428.
4. Плосконос В. Г. Синтез математичних моделей з використанням комп'ютерних технологій з метою прогнозування рівнів забруднення водопотоків технологічних систем виробництва паперу та картону //Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", 2019. № 12(74), С.34-38. DOI: 10.25313/2520-2057-2019-12-5186.

Надійшла до редакції 09.03.2020

---

*Ploskonos V. G.*

**NEW TRENDS IN THE STATE RESEARCH METHODOLOGY OF COMPLEX SYSTEMS OF PAPER AND PAPERBOARD PRODUCTION**

*For the analyst, experiment is the most important stage in many fundamental and applied research. In order to study the object as much as possible and learn about the complex of its properties, it is necessary to investigate it, namely: to carry out experimental researches and to record the results of these studies on the media. This is necessary to compare the achieved level of knowledge of the object with that of the researcher in the process of literary and patent searches. In the future, the knowledge gained during the experimental research is used for practical purposes. This is the main task of scientific search. In turn, the effectiveness of experimental research largely depends on the methodology used in the process of scientific research.*

*The researcher's attention should be focused on at least three aspects of carrying out the search work, at the expense of which it is possible to save considerable time and material resources and, at the same time, to obtain the desired results.*

*In the first stage, it should be noted that the study of the state of technological systems for the production of semi-finished products, paper and cardboard shows that the individual blocks of such technological systems, and therefore the whole technological system is affected by the mass of independent deterministic values, called factors. These factors exert their influence in the process of mass preparation, including the stage of dissolution; cleaning; grinding; composing the composition; casting; pressing, drying of a cloth. After all, the production of paper or cardboard is a sequence of interrelated processes, which, in the long run, ultimately depend on the quality of the products being manufactured.*

*In order to effectively reduce the number of factors that exert their influence, it is advisable for the experimenter to make a preliminary assessment of the influence of each of the factors identified in the literature and patent searches, and to form a group of the most significant factors on this basis. In the future, these factors will be involved in the next stages of experimental research. However, intuitive selection of significant factors is quite subjective and may lead to erroneous conclusions from the results of the analysis of the research results. Therefore, at the stage of preliminary research it is recommended to use statistical methods of selection of factors, namely: methods of expert assessments. These methods are based on the statistical processing of data obtained from a survey of specialists in the field of knowledge or analysis of scientific research. Expert assessments are based on the results of the most recent and unpublished scientific works performed by each expert.*

*Despite their subjectivity, peer reviews provide useful, objective information. This information makes it possible to evaluate the impact of each factor under study. Using this method, the opinion of the expert group is considered to be more reliable than the opinion of the individual expert. The method is based on the fact that the unknown characteristic of the studied phenomenon is treated as a random variable, and each expert's individual assessment of the truth and significance of an event is a reflection of its law of distribution.*

*In the second stage of research, an important aspect is to achieve maximum informativeness of the experiment. It is known that in the course of experimental research, the object under study responds differently to changing factors*

(one or more simultaneously) and, thus, exhibits its complex of properties. The task of the researcher is to plan the experimental studies so that the object in the course of its research maximally manifested its entire complex of properties, regardless of the internal structure of the investigated object, as well as the influence of these or other factors. Thus, the maximum reliability of the results of experimental studies in the conditions of random "noise" interference is ensured. Subsequently, multicriteria analysis of the basic plans and local transformations of each of them are carried out in order to select the most suitable for implementation at the request of the researcher. This is the second aspect of the methodology.

The third, and very important, aspect of research methodology is the development of adequate mathematical models [4], on the basis of which a favorable field is created for modeling and finding optimal conditions with the use of computer technologies. At this stage, taking into account the complexity of technological systems for the production of semi-finished products, paper and cardboard, a number of adequate mathematical models, suitable for modeling purposes, have been created.

Further stages of research work are the use of created mathematical models for modeling purposes. The task is to predict the levels of pollution of water flows of complex technological systems of paper and cardboard production with water-soluble organic, as well as mineral components under conditions of reduction of fresh water consumption from  $40 \text{ m}^3 \setminus t$  to  $10 \text{ m}^3 \setminus t$ . This will give you an opportunity to determine the initial semi-finished products, a complex of auxiliary chemicals, as well as with the scheme of return water use.

**Key words:** methodology, mathematical models, model adequacy, modeling, paper and cardboard production, organic water-soluble substances.

#### **References:**

1. Kikot V.S., Ploskonos V.G. (1986) Identification of characteristics of complex design systems using self-organization and topological method of analysis, *Automatics*, №3, pp. 34-42.
2. Ivakhnenko A.G. Long-term forecasting and control of complex systems (1976), K.: "Tehnika", 311 p.
3. Ploskonos V.G. (2018) The use of computer technologies in the development of plans for experimental research of complex technological systems for the production of paper and cardboard // *International scientific journal "Internauka"*, № 21 (61), vol.3, pp. 50-54. DOI: 10.25313 / 2520-2057-2018-21-4428.
4. Ploskonos V.G. Synthesis of mathematical models using computer technologies to predict the levels of pollution of water flows of technological systems of paper and cardboard production (2019), *International scientific journal "Internauka"*, No. 12 (74), pp.34-38, DOI: 10.25313 / 2520-2057-2019-12-5186.

---

УДК 681.5+004.8

**САЗОНОВ А. Ю., к.т.н., доц. <sup>1</sup>; СЛІПЧЕНКО В. О., магістрант <sup>1</sup>; ПРИВАЛА С. М., магістрант <sup>1</sup>;  
ЧЕРЕПАНСЬКА І. Ю., д.т.н., проф. <sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**<sup>2</sup>Поліський національний університет**

## **ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ПРОДУКТІВ ЗІ СКЛА**

*Рішень в галузі виробництва скляних об'єктів, з функцією впливу на технологічний процес з метою підвищення продуктивності виробництва наразі немає, тому автоматизація керування якістю готової продукції шляхом розроблення та використання експертної системи є актуальним завданням.*

*Досягнення мети запропоновано шляхом розробки та впровадження експертної системи автоматизованого керування якістю продуктів за скла. Для реалізації даної експертної системи розроблено програмне забезпечення; при формуванні експертної бази знань обрано метод оцінки факторів шляхом ранжування; також використано метод розрахунку «ваги» думок експертів; запропоновано підхід до визначення «адекватності» експертів, що полягає у застосуванні методу Романовського; використовується оцінка узгодженості ранжування факторів експертами за допомогою коефіцієнта конкордації Кендалла.*