

USA: – ACM Press – .1995 – pp. 351–358

2. Karni, Z.. Spectral compression of mesh geometry / Z Karni., C Gotsman, . // SIGGRAPH '00:– Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques – 2000 – pp. 279–286

3. Chung, F. Spectral graph theory./ F. Chung // American Mathematical Society – No. 92. . – 1997 – P..742

4. Coifman, R. R. Diffusion wavelets./ R. R Coifman., M. Maggioni, // Applied and Computational Harmonic Analysis, – 21 - 2006–P. 53–94.

5. Mahadevan, S. Value function approximation with diffusion wavelets and laplacian eigenfunctions / R. R Mahadevan, S., M. Maggioni, . // Proceedings of the Neural Information Processing Systems (NIPS). – MIT Press.– 2006 – p. 978-912

6. Belkin, M. / Semi-supervised learning on Riemannian manifolds. / M. Belkin, P. Niyogi, // Machine Learning – 56 – 2004 – p. 209–239.

7. Mallat, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation./ S. G. Mallat, // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, – 1989 –P. 674–693.

8. Bremer, J. C.. Diffusion wavelet packets. / J. C. Bremer, , R. R .Coifman ., M. Maggioni.,, A. D. Szlam // Applied and Computational Harmonic Analysis, – 21 – 2006 – P. 95–112

9. Samus N. 3D image mesh entropy coding / N.S. Samus , E.V. Osharovskaya // Збірник „Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова”: – Одеса: Одес. нац. академія зв’язку ім. О.С.Попова. – 2014. – №2. – С. 214-220.

Рецензія/Peer review : 23.09.2015 р.

Надрукована/Printed :20.10.2015 р.

## УДК 519.876.5

М.П. ДИВАК, С.Я. КРЕПИЧ, Т.М. ДИВАК, В.І. МАНЖУЛА

Тернопільський національний економічний університет

### МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЛІНІЇ ПО ВИГОТОВЛЕННЮ ГІПСОКАРТОНУ В УМОВАХ ЗМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИРОВИНИ

*В статті розглянута задача моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії по виготовленню гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини. Створена інтервальна модель часу затвердіння гіпсокартону в залежності від параметрів технологічного обладнання та характеристик сировини. Розглянута задача синтезу параметрів технологічного обладнання, характеристик сировини та їхніх технологічних допусків. Додатково введені обмеження, на параметри технологічного обладнання та характеристики складників технологічного процесу з метою отримання множини розв’язків ІСЛАР, які відповідають фізичному змісту процесів.*

*Ключові слова: функціональна придатність, гіпсо-водяна суміш, характеристики сировини, параметри технологічного обладнання, інтервальна система*

M.P. DYVAK, S.YA. KREPYCH, T.M. DYVAK, V.I. MANZHULA

Ternopil National Economic University

### MODELING AND TECHNOLOGICAL SUPPORT OF FUNCTIONAL SUITABILITY OF TECHNICAL EQUIPMENT LINE FOR MANUFACTURING DRYWALL IN CONDITION OF VARIABLE RAW MATERIALS CHARACTERISTICS

*In the paper the problem of modeling and providing of functional suitability of the technical equipment of lines for the manufacture of gypsum board in terms of raw characteristics changes. Created interval model of solidification time for drywall depending on parameters of process equipment and characteristics of the raw material. Considered the task of synthesis of technological equipment parameters, raw materials characteristics and their technical tolerances. Additionally imposed restrictions on parameters of technical equipment and characteristics of the technical process components to obtain ISLAE set of solutions that meet the physical processes content.*

*Keywords: functional suitability, gypsum-water mixture, the characteristics of raw materials, process equipment parameters, interval system*

#### Постановка проблеми

Гіпсокартон є одним із найбільш поширених облицювальних матеріалів у будівництві [1]. Як вихідні матеріали для виготовлення гіпсокартонних плит використовують напівводяний гіпс ( $\text{CaSO}_4(0,5-0,7)\text{H}_2\text{O}$ ), добавки для прискорення чи сповільнення процесу затвердіння гіпсо-водної суміші, піноутворювачі та високоякісний багат шаровий пресований картон товщиною не більше 0,6 мм. Напівводяний гіпс одержують із природного гіпсу шляхом випалювання. Одним із найбільших виробників гіпсокартону є фірма KNAUFF. На підприємствах згаданої компанії функціонують високотехнологічні лінії по виробництву гіпсокартонних плит. Розглянемо схематично устаткування для виготовлення гіпсокартону.

Гіпсокартонні плити виготовляють за безперервною технологією на великих конвеєрних установках. Найважливіші ділянки технологічної лінії з виробництва гіпсокартонних плит рис. 1 такі: підготовка водно-гіпсової суміші та подача її на формувальний стіл; формування полотна (гіпсового осердя обклеєного з обох боків картоном); затвердіння полотна гіпсу в процесі переміщення на стрічковому

конвеєрі; порізка полотна на листи; розподіл листів за допомогою консольного конвеєра; сушка листів у сушарці з подальшим вивантаженням, контролем якості та складуванням.

Підготовка водно-гіпсової суміші здійснюється подачею подрібненого гіпсо-порошку з бункера 2 у змішувач 6 разом із водою та компонентами з резервуарів 4, 5, зокрема крохмалем, волокном, в'язучими та піноутворюючими речовинами, які надають водно-гіпсовій суміші еластичності та клейкості. Зауважимо, що в масі готового виробу 93% гіпсу, 6% - картон та 1% інших компонент та вологи [3].

Формування полотна здійснюється наступним чином. Із машини подачі картону 1 на формувач подають підложку із картону на яку викладають гіпсову суміш і формують за допомогою формувача, позначеного 1 на рис. 1. Тоді сформоване гіпсо-водне осердя накривають верхнім шаром картону із машини подачі 8 і завальцовують на нижньому шарі. Попередньо верхній шар картону по краях змащується клеєм із резервуара 7 клейовою машиною. Далі на конвеєрі обидва шари картону завальцовують і отримують полотно гіпсокартону, із товщиною встановленою формувачем 9. Зазначений етап забезпечує допустиму товщину гіпсокартону та надійне приклеювання картону до гіпсового осердя.

На наступному етапі, безпосередньо на стрічковому конвеєрі 10 відбувається рівномірне необхідне твердіння гіпсу. Цей процес регулюють швидкістю руху стрічки на роликівому конвеєрі в межах від 2м/хв. до 5м/хв.

Коли гіпс набирає необхідної твердості під час руху на стрічковому конвеєрі 10, то надалі здійснюється розділення полотна на листи. Для цього використовується автоматичний різак гільйотинного типу 11. Після чого окремі листи за допомогою консольного конвеєра 13 подають до сушарки 14. Розподільник розподіляє листи по конвеєрам сушарки із сповільненою швидкістю руху від 0,20 м/хв. до 0,40м/хв. Час перебування листа в сушарці – близько однієї години. Далі плити вивантажуються із сушарки пакують і штабелюють [2].

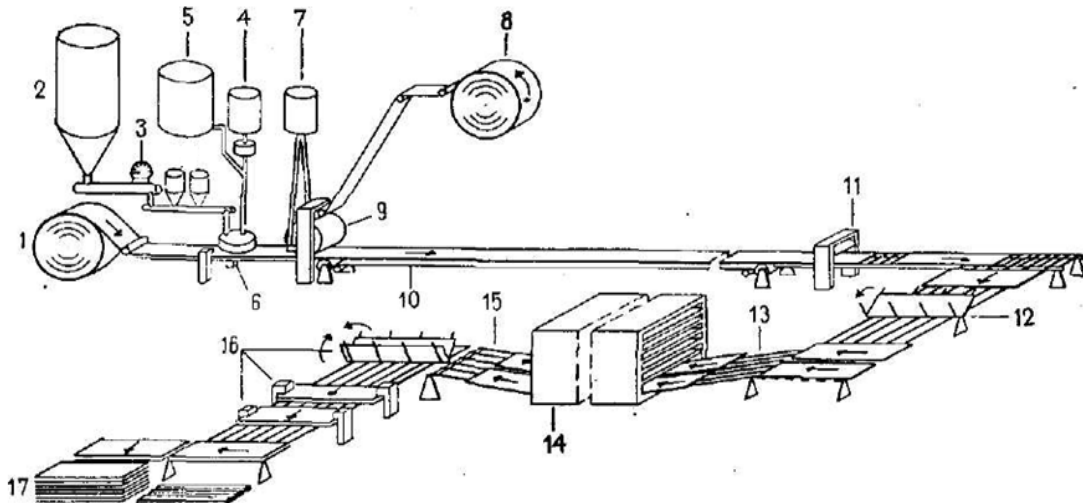


Рис. 1. Спрощена схема виробництва гіпсокартонних плит [2]:

1 — машина подачі рулонного картону для лицьової сторони плит; 2 — бункер для гіпсу; 3 — ваговий дозатор; 4, 5 — смісті для води та добавок; 6 — гіпсозмішувач; 7 — смість для клею; 8 — машина подачі рулонного картону для тильної сторони плит; 9 — формуючий стіл; 10 — стрічковий конвеєр; 11 — відрізний ніж; 12 — кантувач плит; 13 — завантажувальний міст; 14 — сушарка; 15 — вивантажувальний міст; 16 — установка для укладання і пакування; 17 — штабелювальник

Характер затвердіння гіпсового осердя, а також довжина і швидкість руху конвеєра на ділянці затвердіння залежать одна від одної. На великих сучасних установках компанії KNAUFF з високошвидкісним конвеєром довжина ділянок схоплювання становить до 300м.

Для виготовлення високоякісного гіпсокартону лінії повністю автоматизовані, а також потрібно чітко дотримуватися технологічних параметрів як обладнання так і характеристик сировини, наприклад вологості гіпсу, граничного часу його зберігання чи концентрації додатків, що прискорюють чи сповільнюють процес затвердіння гіпсоводної суміші. Разом з тим в Україні функціонують невеликі підприємства обладнанні лініями виготовлені в Китаї для виробництва гіпсокартону з продуктивністю 40-60 плит за годину стандартних розмірів (товщина 9,5мм, довжина 2500мм та ширина 1200мм). Як правило, зазначені лінії є низької вартості і високорентабельні. Одна із таких ліній функціонує в ПП "УКРАЇНСЬКІ ГПСОКАРТОННІ СИСТЕМИ" на Хмельниччині.

На рис. 2 наведено фрагмент технологічного обладнання, встановленого в цеху підприємства, яке забезпечує процес підготовки гіпсоводної суміші, подачі її на формувальний стіл та формування гіпсокартонної плити. Саме ця частина обладнання має ряд недоліків. По-перше, низький рівень автоматизації. Наприклад, в таких лініях відсутні сенсори неперервного контролю якості водно-гіпсової суміші на виході із змішувача та пов'язана з цим сенсором автоматична система управління подачі води, гіпсу, піноутворювача та інших додатків в гіпсозмішувач 6 на рис.1. По-друге, часто терміни та умови

зберігання сировини, зокрема гіпсу, відрізняються від технологічно заданих. Нажаль, зазначені недоліки пов'язані між собою, що не дає можливості створити високоефективну автоматичну систему управління процесом забезпечення високої якості водно-гіпсової суміші. Слід також зазначити, що вказані недоліки не вичерпують увесь перелік і в результаті призводять до зниження функціональної придатності обладнання і, як результат, - якості гіпсокартонних плит, а також створюють проблему потреби періодичного налаштування (переналаштування) обладнання із врахуванням змінних, часто випадкових характеристик сировини. В результаті такого процесу налаштування при запуску лінії, від 40 до 80 плит є бракованими, до того ж переналаштування вимагає значних витрат часу, оскільки процеси є інерційними (від моменту підготовки гіпсоводної суміші до виходу готової гіпсокартонної плити - проміжок часу понад 60 хвилин). Тому актуальною є задача моделювання характеристик цієї частини технологічного обладнання та забезпечення його функціональної придатності в умовах змінних характеристик складників для виробництва гіпсокартону.



Рис. 2. Фрагмент технологічного обладнання, яке забезпечує процес підготовки гіпсоводної суміші та подачі на формувальний стіл

### Постановка задачі

Розглянемо основні параметри устаткування для підготовки водно-гіпсової суміші та формування полотна, які визначають його функціональну придатність в умовах змінних випадковим чином характеристик складників для виготовлення гіпсокартону. Спочатку визначимо характеристики функціональної придатності устаткування. Як бачимо із опису технологічного процесу, характеристикою функціональної придатності лінії можемо вважати: допустимий інтервал швидкості руху конвеєрної стрічки, на якій відбувається затвердіння (схвачування) гіпсового осердя, або відповідну характеристику – час затвердіння гіпсового осердя. Ця характеристика буде безпосередньо визначати допустимі межі швидкості руху конвеєрної стрічки, які забезпечують затвердіння гіпсового осердя до моменту його наближення до різача гільйотинного типу. Для лінії виробництва гіпсокартону, встановленої в цеху ПП "УКРАЇНСЬКІ ГІПСОКАРТОННІ СИСТЕМИ" відстань від формувального стола до різача складає 35 метрів. Зауважимо, чим довша конвеєрна лінія, тим більша продуктивність системи. Щоправда кінцевий обсяг виходу готової продукції обмежується продуктивністю сушарки [4]. Водночас, на етапах підготовки гіпсоводної суміші, подачі її на формувальний стіл та формування гіпсокартонної плити необхідно забезпечити такі параметри технологічного обладнання, які б своєю чергою забезпечували функціональну придатність системи для різних швидкостей конвеєрної лінії.

Позначимо час затвердіння гіпсового осердя для різних швидкостей руху конвеєрної лінії за  $t_{v_i}$ , де  $v_i$  – фіксована швидкість руху конвеєрної лінії. Тоді умову функціональної придатності технологічного обладнання вище зазначених етапів сформулюємо у такому вигляді:

$$t_{v_i} \in [t_{v_i}^-; t_{v_i}^+], \quad \forall i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

де  $N$  – кількість заданих режимів роботи конвеєрної лінії;  $[t_{v_i}^-; t_{v_i}^+]$  - відомі допустимі нижнє та верхнє значення часу твердіння гіпсового осердя, пов'язані з фіксованими швидкостями руху конвеєрної лінії.

Своєю чергою, час твердіння гіпсового осердя визначається такими технологічними параметрами обладнання та характеристиками компонент гіпсоводної суміші: параметрами конвеєрів, швидкостями подачі гіпсу -  $V_1$ , води з розчиненим крохмалем -  $V_2$ , піноутворювача  $V_3$ , повітря  $V_4$  та коректора часу затвердіння  $V_5$ ; характеристики гіпсу, яку визначають як діаметр  $d$  плями розтікання фіксованого об'єму

гіпсоводної суміші в пропорції гіпс/вода=1/0,7, характеристики коректора затвердіння  $\tau$ , яка змінюється в залежності від часу зберігання.

Враховуючи викладене вище, математичну модель, яка описує залежність між часом затвердіння та чинниками, які його визначають шукатимемо в такому вигляді:

$$\hat{t}_{v_i} = f(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau) \quad (2)$$

на основі аналізу інтервальних даних [5], оскільки усі зазначені величини отримані експериментальними вимірювання з певними похибками. В цьому випадку математична модель (2) набуде інтервального вигляду:

$$[\hat{t}_{v_i}^-; \hat{t}_{v_i}^+] = [f^-(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau); f^+(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau)], \quad (3)$$

$[f^-(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau); f^+(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau)]$  - функціональний коридор інтервальних моделей для часу затвердіння гіпсового осердя;  $[\hat{t}_{v_i}^-; \hat{t}_{v_i}^+]$  - інтервальна оцінка значення часу твердіння гіпсового осердя.

Тоді умови функціональної придатності обладнання набудуть такого вигляду:

$$[\hat{t}_{v_i}^-; \hat{t}_{v_i}^+] \subset [t_{v_i}^-; t_{v_i}^+], \quad \forall i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Тепер підставимо в умови (4) замість  $[\hat{t}_{v_i}^-; \hat{t}_{v_i}^+]$  - інтервальних оцінок значень часу твердіння гіпсового осердя для різних швидкостей конвеєра межі функціонального коридору за виразом (3), отримаємо:

$$t_{v_i}^- \leq [f^-(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau); f^+(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau)] \leq t_{v_i}^+, \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (5)$$

Отримана система, яка визначає умови функціональної придатності технологічного обладнання є інтервальною системою алгебричних рівнянь. Її розв'язком є область допустимих параметрів обладнання та характеристик складників для виготовлення гіпсокартонних плит.

Таким чином для побудови моделі та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії по виготовленню гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини необхідно:

а) на основі аналізу експериментальних інтервальних даних побудувати інтервальну модель у вигляді виразу (3);

б) на основі інтервальної системи алгебричних рівнянь (5) обчислити допуски на параметри технологічного обладнання та характеристики складників для виготовлення гіпсокартону.

#### Інтервальна модель характеристики технологічного процесу

Для побудови інтервальної моделі проводилося вимірювання часу затвердіння гіпсоводної суміші для різних значень параметрів технологічного обладнання та характеристик складників гіпсоводної суміші. Час затвердіння вимірювався з 5% відносною похибкою. В результаті зазначена характеристика представлена в інтервальному вигляді:

$$[\tilde{t}_{v_i}^-; \tilde{t}_{v_i}^+] = [t_{v_i} - t_{v_i} \cdot \delta_i; t_{v_i} + t_{v_i} \cdot \delta_i], \quad (6)$$

де  $t_{v_i}, \delta_i$  - виміряне значення часу затвердіння гіпсо-водної суміші та відносна похибка його вимірювання, відповідно.

Інші характеристики встановлювалися з похибками, які можна не враховувати при побудові моделі. Наприклад діаметр плями розтікання гіпсо-водної суміші виміряно з точністю до 0,5 мм, що в процентному відношенні складає максимум 0,4%. В результаті отримано таблицю вихідних даних, фрагмент якої наведено нижче.

Таблиця 1

#### Вимірювання часу затвердіння гіпсоводної суміші

$i$	Діаметр плями розтікання гіпсоводної суміші	Швидкість подачі гіпсу	Швидкість подачі води з розчинним крохмалем	Швидкість подачі коректору часу затвердіння	Швидкість подачі піноутворювача	Швидкість подачі повітря	Характеристика коректора затвердіння суміші	Швидкість руху конвеєрної лінії	Інтервальні дані твердіння гіпсоводної суміші
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$d$ , мм.	$V_1$ , кг/хв.	$V_2$ , кг/хв.	$V_5$ , г/хв.	$V_3$ , кг/хв.	$V_4$ , кг/хв.	$\tau$ , хв.	$v_i$ , м/хв	$[\tilde{t}_{v_i}^-; \tilde{t}_{v_i}^+]$ , хв.
1	130	27,2	19,2	0	0,14	0,08	0	8	[3,705; 4,095]
2	130	30,1	18	0	0,14	0,08	0	8	[2,945; 3,255]
3	130	27,0	19,3	0,5	0,14	0,08	3	4	[6,08; 6,72]
4	130	27,1	23,3	0	0,14	0,08	0	8	[4,085; 4,515]
5	140	27,4	19,1	0	0,14	0,08	0	7	[3,99; 4,41]
6	140	32,4	18,1	0	0,14	0,08	0	8	[3,42; 3,78]
7	140	27,4	19,1	0,4	0,14	0,08	2,8	4	[6,65; 7,35]
8	140	27,3	19,5	0,2	0,14	0,08	1,8	6	[4,94; 5,46]
9	150	27,2	19,4	0	0,15	0,08	0	7	[4,37; 4,83]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	150	27,2	19,4	0	0,20	0,08	0	6	[5,035; 5,565]
11	150	27,3	19,2	0,3	0,15	0,08	2,5	4	[6,175; 6,825]
12	150	27,2	19,4	0	0,10	0,08	0	6	[4,655; 5,145]
13	160	27,2	19,5	0	0,14	0,08	0	4	[6,365; 7,035]
14	160	27,2	19,5	0,1	0,14	0,08	0,5	4	[6,65; 7,35]
15	160	27,2	19,5	0,05	0,14	0,08	0,4	4	[6,745; 7,455]
16	160	27,2	19,1	0,1	0,14	0,08	-2,5	6	[4,845; 5,355]
17	170	27,2	19,5	0	0,14	0,08	0	4	[6,935; 7,665]
18	180	27,0	19,3	0	0,14	0,08	0	3	[7,885; 8,715]
19	180	27,0	19,3	0,3	0,14	0,08	-2	4	[6,555; 7,245]

На першому етапі побудови математичної моделі обрали лінійну структуру моделі у такому вигляді:

$$\hat{t}_{v_i} = g_1 \cdot d - g_2 \cdot V_1 + g_3 \cdot V_2 - g_4 \cdot V_5 - g_5 \cdot V_3 + g_6 \cdot V_4 - g_7 \cdot v_i + g_8 \cdot \tau + g_9 \quad (7)$$

де  $g_i, i = \overline{1..9}$  – невідомі коефіцієнти, значення яких необхідно оцінити на основі аналізу інтервальних даних наведених в таблиці 1.

Тепер користуючись даними таблиці, складемо інтервальну систему лінійних алгебричних рівнянь (ІСЛАР) в такому вигляді:

$$\begin{cases} \tilde{t}_{v_1}^- \leq g_1 \cdot d - g_2 \cdot V_1 + g_3 \cdot V_2 - g_4 \cdot V_5 - g_5 \cdot V_3 + g_6 \cdot V_4 - g_7 \cdot v_1 + g_8 \cdot \tau + g_9 \leq \tilde{t}_{v_1}^+ \\ \dots \\ \tilde{t}_{v_i}^- \leq g_1 \cdot d - g_2 \cdot V_1 + g_3 \cdot V_2 - g_4 \cdot V_5 - g_5 \cdot V_3 + g_6 \cdot V_4 - g_7 \cdot v_i + g_8 \cdot \tau + g_9 \leq \tilde{t}_{v_i}^+ \\ \dots \\ \tilde{t}_{v_{19}}^- \leq g_1 \cdot d - g_2 \cdot V_1 + g_3 \cdot V_2 - g_4 \cdot V_5 - g_5 \cdot V_3 + g_6 \cdot V_4 - g_7 \cdot v_{19} + g_8 \cdot \tau + g_9 \leq \tilde{t}_{v_{19}}^+ \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язком ІСЛАР (8) є область коефіцієнтів моделі. Апроксимацію цієї області представимо у вигляді описаного навколо області прямокутного багатовимірного паралелепіпеда. Завдяки такому представленню значення коефіцієнтів моделі будуть представлені в інтервальному вигляді.

Для знаходження інтервальних оцінок коефіцієнтів моделі із ІСЛАР (8) використаємо метод аналізу інтервальних даних та пакет прикладних програм INTERDAT [4]. В результаті виконаних обчислень отримуємо таку інтервальну модель:

$$[\hat{t}_{v_i}^-; \hat{t}_{v_i}^+] = [2, 1; 2, 2] + [0, 029; 0, 031] \cdot d - [0, 056; 0, 064] \cdot V_1 + [0, 13; 0, 15] \cdot V_2 - [0, 095; 0, 105] \cdot V_5 - \quad (9)$$

$$- [6, 62; 7, 03] \cdot V_3 + [18, 7; 19, 9] \cdot V_4 - [0, 51; 0, 55] \cdot v_i + [0, 22; 0, 24] \cdot \tau$$

Отримана інтервальна модель забезпечує обчислення гарантованої інтервальної оцінки часу затвердіння гіпсоводної суміші (гісового осердя плити) для заданих параметрів технологічного обладнання та технологічних характеристик складників для виготовлення гіпсокартонних плит.

#### Забезпечення функціональної придатності лінії по виробництву гіпсокартону

Представимо інтервальну модель (9) для оптимальних швидкостей лінії конвеєра  $v_i = \overline{1..8}$  м/хв. Для кожної фіксованої швидкості лінії конвеєра відомі допустимі нижнє та верхнє значення часу твердіння гіпсового осердя, зокрема для швидкості руху конвеєра 1 м/хв час твердіння гіпсового осердя складає [25;31] хв, для 2 м/хв. - [12,6;15,6] хв тощо. Отже інтервальна модель (9) набуде вигляду:

$$\begin{cases}
 25 \leq [1,55;1,69] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - \\
 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 31 \\
 12,6 \leq [1;1,18] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - \\
 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 15,6 \\
 8,37 \leq [0,45;0,67] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - \\
 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 10,23 \\
 6,3 \leq [-0,1;0,16] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - \\
 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 7,7 \\
 5,04 \leq [-0,65;-0,35] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - \\
 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 6,16 \\
 4,23 \leq [-1,2;-0,86] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - \\
 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 5,17 \\
 3,6 \leq [-1,75;-1,37] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - \\
 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 4,4 \\
 3,15 \leq [-2,3;-1,88] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - \\
 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 3,85
 \end{cases} \quad (10)$$

Введемо обмеження, на параметри технологічного обладнання та характеристики складників технологічного процесу з метою отримання множини розв'язків ІСЛАР, які відповідають фізичному змісту процесів. А саме, введемо допустимі межі: на характеристики якості гіпсо-водної суміші(розтікання), на параметри технологічного обладнання щодо швидкості подачі гіпсу, води з розчиненим крохмалем, корегуючої речовини, піноутворювача, повітря та обмеження на характеристику якості корегуючої речовини, отримаємо таку додаткову систему нерівностей:

$$\begin{cases}
 130 \leq d \leq 180 \\
 15 \leq V_1 \leq 40 \\
 10 \leq V_2 \leq 30 \\
 0 \leq V_3 \leq 0,2 \\
 0,05 \leq V_4 \leq 0,15 \\
 0 \leq V_5 \leq 1 \\
 -2 \leq \tau \leq 2
 \end{cases} \quad (11)$$

Доповнимо ІСЛАР (10) системою нерівностей (11). Тепер спираючись на «метод синтезу параметрів технічних систем на основі допускового оцінювання з урахуванням допусків на параметри технічних систем», наведений в праці [6] обчислимо значення параметрів технологічного обладнання, значення характеристик складників технологічного процесу виготовлення гіпсокартону, а також їхні технологічні допуски. В нашому випадку, суть застосування методу полягає в пошуку множинного розв'язку ІСЛАР (10-11) у вигляді інтервальних оцінок параметрів технологічного процесу. Як відомо з праці [6], для знаходження цих інтервальних оцінок ІСЛАР (10-11) необхідно перетворити до оптимізаційної задачі виду :

$$F([\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta b_j^-, \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta b_j^+]) \xrightarrow{\bar{b}_k, \delta b_j} \min, \bar{b}_j > 0, \delta b_j > \delta b_j^-, j = 1..7 \quad (12)$$

де  $\delta b_j^{\pm}$  - задані мінімально допустимі допуски на параметри технологічного обладнання, характеристик складників технологічного процесу виготовлення гіпсокартону; вектор  $\bar{b}_k = (d, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, \tau)$ ;  $F([\bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta b_j^-, \bar{b}_k + \bar{b}_k \cdot \delta b_j^+])$  - значення функції мети, яка побудована на основі ІСЛАР (10-11) і на кожній ітерації визначає досягнуту «якість» наближення оцінки вектора параметрів системи до шуканих номінальних значень. Інтервальний вектор оцінок параметрів системи отримуємо на основі методу випадкового пошуку з використанням модифікованого методу направляючого конуса Растрігіна для випадку знаходження інтервальних розв'язків оптимізаційної задачі [6].

Результатом застосування вище зазначеного методу синтезу параметрів технічних систем та розробленого на його основі програмного комплексу, функціональні можливості якого описані в праці[7], отримаємо інтервальні вектори значень параметрів та характеристик системи, зокрема для:

- діаметру плями розтікання гіпсоводної суміші –  $d = [161,7;168,3]$ ;
- швидкості подачі гіпсу –  $V_1 = [25,02;29,37]$ ;
- швидкості подачі води з розчиненим крохмалем –  $V_2 = [18,62;20,18]$ ;

- швидкості подачі коректора часу затвердіння –  $V_5 = [0,099;0,101]$ ;
- швидкості подачі піноутворювача –  $V_3 = [0,137;0,142]$ ;
- швидкості подачі повітря –  $V_4 = [0,079;0,081]$ ;
- характеристики коректору затвердіння –  $\tau = [0,00099;0,00101]$ .

Отримані допуски як на параметри технологічного обладнання, так і на характеристики складників для виготовлення гіпсокартону повністю відповідають фізичному змісту і забезпечують функціональну придатність лінії по виробництву гіпсокартону. З врахуванням отриманих результатів технологів достатньо переконатись, що характеристики сировини (наприклад, гіпсу) знаходяться в заданих межах і в такому випадку це усуває необхідність додаткового експериментального налаштування технологічного обладнання. Таким чином розроблені в праці математичні моделі функціональної придатності лінії по виробництву гіпсокартону дають можливість суттєво зменшити час налаштування технологічної лінії і практично виключити на цій стадії виробництво бракованих гіпсокартонних плит

### Висновки

Розглянута задача моделювання параметрів технологічного обладнання та забезпечення його функціональної придатності в умовах змінних характеристик складників для виробництва гіпсокартону. В процесі аналізу встановлено, що функціональна придатність лінії по виробництву гіпсокартону безпосередньо залежить від параметрів технологічного процесу, характеристик складників і визначається допусками на час затвердіння гіпсового осердя при переміщенні на конвеєрній лінії. Створена інтервальна модель затвердіння гіпсового осердя в залежності від наступних характеристик: діаметру розтікання гіпсоводної суміші, швидкостей подачі гіпсу, води з розчиненим крохмалем, повітря, коректора часу затвердіння та піноутворювача, а також характеристики якості коректора. Показана адекватність математичної моделі. На основі моделі розглянута задача синтезу параметрів технологічного обладнання, значення характеристик складників технологічного процесу виготовлення гіпсокартону, а також їхніх технологічних допусків. Отримані технологічні допуски повністю відповідають фізичному змісту та забезпечують функціональну придатність лінії по виробництву гіпсокартону.

### Література

1. <http://msd.in.ua/lin-proizv-gips-karton/>
2. <http://asyan.org/potra>
3. Дворкін Л.Й. Опоряджувальні матеріали і вироби/Л.Й.Дворкін/ Навч. посібник – 2-ге вид. Перероб. – К.: Вища шк., 1996. – 335 с.
4. Дивак Т.М. Параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на прикладі макромоделі розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння / Т. М. Дивак / Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : міжнар. наук.–техн. журнал. – 2012. – Вип. 3. – С. 79–85.
5. Дивак М.П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія /М.П.Дивак/Видавництво ТНЕУ «Економічна думка» – Тернопіль, 2011. – 216с.
6. Крепич С.Я. Порівняльний аналіз часової складності процедур випадкового пошуку в задачі синтезу при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик та допусків на параметри його елементів /С.Я.Крепич/ Вісник ТНТУ, Науковий журнал – Тернопіль, 2015. - №1(77). – С.204-219
7. Крепич С.Я. Програмний комплекс оцінювання функціональної придатності пристроїв при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик та допусків на параметри їх елементів /С.Я.Крепич/ Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2015. – Тернопіль: ТНЕУ, 2015. – С.23-25

### References

1. <http://msd.in.ua/lin-proizv-gips-karton/>
2. <http://asyan.org/potra>
3. Dvorkin L.Y. Oporядzhuval'ni materialy' i vyrobny' /L.Y.Dvorkin/ Navch. posibny'k – 2-he vyd. Pererob. – K.: Vy'shcha shk., 1996. – 335 s.
4. Dyvak T.M. Parametry'chna identy'fikatsiya interval'noho rizny'tsevoho operatora na pry'kladі makromodeli rozpodilu volohosti u ly'sti hipsokartonu v protsesi yoho sushinnya / T. M. Dyvak / Informatsiyeni tekhnolohiyi ta komp'yuterna inzheneriya : mizhnar. nauk.–tekh. zhurnal. – 2012. – Vyp. 3. – S. 79–85.
5. Dyvak M.P. Zadachi matematy'chnoho modelyuvannya staty'chnykh sy'stem z interval'ny'my' dany'my':monohrafiya /M.P.Dyvak/ Vy'davny'tstvo TNEU «Ekonomiczna dumka» – Ternopil', 2011. – 216s.
6. Krepych S.Ya. Porivnyal'ny'y analiz chasovoyi skladnosti protsedur vy'padkovoho poshuku v zadachi sy'ntezu pry' zadany'kh dopusty'my'kh znachennyakh vykhidny'kh kharaktery'sty'k ta dopuskiv na parametry' yoho elementiv /S.Ya.Krepych/ Visny'k TNTU, Naukovy'y zhurnal – Ternopil', 2015. - №1(77). – S.204-219
7. Krepych S.Ya. Prohramny'y kompleks otsinyuvannya funktsional'noyi pry'datnosti pry'stroiyv pry' zadany'kh dopusty'my'kh znachennyakh vy'khidny'kh kharaktery'sty'k ta dopuskiv na parametry' yikh elementiv /S.Ya.Krepych/ Suchasni komp'yuterni informatsiyeni tekhnolohiyi: Materialy' V vseukrayins'koyi shkoly'-seminaru molody'kh vcheny'kh i studentiv ASIT'2015. – Ternopil': TNEU, 2015. – P.23-25

Рецензія/Peer review : 10.11.2014 р.

Надрукована/Printed :28.10.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., доцент Добротвор І.Г.