

¹ **В.О. Галушко**, д.т.н, проф. кафедри будівельних конструкцій, будівель та споруд, ORCID 0000-0001-5744-0486;

² **Д.Ю. Уваров**, аспірант кафедри ТБВ, ОДАБА, керівник проектно-конструкторського відділу ТОВ «БП «ФОРТ», ORCID: 0000-0002-3591-342X;

³ **А.С. Уварова**, студентка, ORCID: 0000-0002-1416-7181.

¹ Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Івано-Франківськ, Україна;

² Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна;

³ Хортицька навчально-реабілітаційна академія, м. Запоріжжя, Україна

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ В ОРГАНІЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Анотація. У статті розглядаються деякі завдання економіки та організації будівництва, які можна вирішити методом лінійного програмування за допомогою PTC Mathcad Prime, Microsoft 365 Excel та ранжуванням даних. Авторами проаналізовано літературу, де представлено існуючі методи оптимізації в різних галузях та галузі будівельного виробництва. Показані основні принципи використання лінійного програмування в різних програмних засобах. Авторами детально розібрано порівняння різних методів для підбору оптимальних технологічних послідовностей. Представлено приклади вирішення задач оптимізації у будівельному виробництві засобами лінійного програмування та методом ранжування даних. Для рішення задач використовували технологію нанесення суміші на вертикальну поверхню. А саме: очистки фасаду, штукатурення поверхні, фарбування поверхні. Були розглянуті три технології. Для нанесення на вертикальну поверхню використовують стандартні обладнання це риштування, драбини та люльки. Технологічна послідовність складається з наступних процесів. Це підготовка поверхні. Вона може виконуватись трьома способами: очищення вручну, піскоструменевим апаратом, гідроструменеве очищення. Наступний процес це технології штукатурення поверхні. На цьому етапі розглянуто два варіанта: ручне штукатурення та механізоване нанесення штукатурного розчину. Далі виконується процес гуртування поверхні. Цей процес може виконуватись або вручну, або за допомогою пульвелізатора. І останній процес – фарбування поверхні. Розглянуто ручне фарбування або механізованим пристроєм. Наступним кроком було проаналізовано можливості кожного з методів оптимізаційного пошуку та надано рекомендації з їх можливого застосування при вирішенні аналогічних задач. Створено математичну модель, що може бути масштабована для впровадження оптимізаційного пошуку в групах технологічних послідовностей з різними методами виконання робіт. Також були зроблені висновки, щодо використання представлених методів у вирішенні аналогічних задач будівельного виробництва. Данна стаття може бути аналогом для розрахунку не тільки механізаційних процесів, але вона може стати нарадою для автоматизації будівельних процесів.

Ключові слова: лінійне програмування, метод оптимізації, технологічні процеси при виконанні оздоблювальних робіт.

Вступ

Методи оптимізації широко застосовуються на вирішення практичних завдань будівництва. Наприклад, у статтях [1-3] методи оптимізації використовуються визначення оптимального розташування об'єктів будівельного майданчика. Також оптимізаційні методи використовуються широко і для вирішення завдань будівельної механіки, наприклад, для визначення граничного рівноважного стану пружно-пластичних систем для розрахунку вантових систем в геометрично-нелінійній постановці [4-6]. У статті [7] автори застосували оптимізаційні методи для підбору значень попередньої напруги волокон у композиційних матеріалах та плитах. Математичні методи оптимізації були застосовані в програмуванні [8] та для розрахунку оптимальних параметрів у задачах економіки [9].

Одним із найпоширеніших методів оптимізації є лінійна оптимізація чи лінійне програмування, де розглядаються оптимізаційні задачі із лінійними

цільовими функціями і областю пошуку, що задається лінійними обмеженнями, тобто є багатогранником чи багатогранною областю. Цей метод, зокрема, застосовується в будівельній механіці для визначення граничної рівноваги пружно-пластичних конструкцій [4-6] та плануванні та керуванні [10]. Теорія методу лінійного програмування та приклади вирішення багатьох завдань викладені, зокрема, у [11, 12].

Матеріали і методи досліджень

Сьогодні метод лінійної оптимізації дуже поширений не лише в промисловості, а й у будівництві. Спробуємо за допомогою цього метода обрати ефективний спосіб для нанесення фарби на вертикальну поверхню. Оберемо три технології. Для нанесення на вертикальну поверхню використовують стандартні обладнання це риштування, драбини та люльки. Технологічна послідовність складається з наступних процесів. Це підготовка поверхні. Вона може виконуватись трьома способами: очищення вручну, піско-

струменевим апаратом, гідроструменем. Наступний процес це технології штукатурення поверхні. На цьому етапі розглянуто два варіанта: ручне штукатурення та механізоване нанесення штукатурного розчину. Далі виконується процес ґрунтування поверхні. Цей процес може виконуватись або в ручну, або за допомогою пульвелізатора. І останій процес – фарбування поверхні. Розглянуто ручне фарбування або механізованим пристроєм. Таким чином ми задаємо три варіанта по дев'ять процесів. Спробуємо за допомогою трудомісткості підібрати ефективні варіанти при нанесенні фарби на вертикальну поверхню.

Мета досліджень.

підібрати теоретично за допомогою метода

лінійної оптимізації найбільш ефективний варіант технологічного процесу при нанесенні фарби на вертикальну поверхню.

Виклад основного матеріалу

Рішення типової задачі організації будівельного виробництва. До типових задач організації будівельного виробництва є пошук оптимальних методів виконання технологій та технологічних послідовностей в циклах будівельного виробництва.

Для вибору оптимальних технологій та знаходження кращих технологічних послідовностей для фасадних робіт, розробимо таблицю на основі витрат труда робітників, розділюючи по відповідним групам технологій.

Таблиця 1.

Дані для аналізу

№з./п.	Назва технології	Витрати труда робітників, не зайнятих обслуговуванням машин, люд.-год. На 100 кв. м витрати труда робітників, що обслуговують машини, люд.-год. На 100 кв. м (Шифр і номер позиції нормативу)		
		Спосіб виконання робіт		
		З землі та риштувань	З драбин або навісних систем	З люльок
1	2	3	4	5
1. Технології очистки фасаду				
1.1	Очищення вручну	<u>42,41</u> - (PH12-65-4)	<u>53,13</u> - (PH12-65-5)	<u>50,99</u> - (PH12-65-6)
1.2	Піскоструменевим апаратом	<u>26,07</u> 11,4224 (PH11-51-2)	<u>31,28</u> 13,7069 (P11-51-1)	<u>31,19</u> 13,7116 (PH11-51-2)
1.3	Гідроструменеве очищення	<u>45,5</u> 1,78 (PP13-8037)		
2. Технології штукатурення поверхні				
2.1	Ручне штукатурення	<u>211</u> 1,8035 (PP15-1109)		<u>437,42</u> 1,3038 (PH11-19-1)
2.2	Механізоване	<u>34,98</u> 0,4704 (PP15-5411)		
3. Технології ґрунтування поверхні				
3.1	Ручне ґрунтування	<u>18,95</u> 0,25 (PP15-5399)		
3.2	Ґрунтування пульвелізатором	<u>8,34</u> 0,4715 (PH12-27-1)	<u>11,66</u> 0,6095 (PH12-27-2)	<u>13,53</u> 0,575 (PH12-27-3)
Технології фарбування поверхні				
4.1	Ручне фарбування	<u>14,3</u> 0,0222 (EH15-158-1)		<u>21,89</u> - (EH15-162-1)
4.2	Механізоване фарбування	<u>12,40</u> 0,2381 (E13-21-2)		

Пошук оптимальних технологічних послідовностей засобами РТС Mathcad Prime.

Для пошуку загальних оптимальних послідовностей необхідно знайти оптимальні значення в кожній групі та підгрупі.

Обмеження кількості даних в групі технологій

$$t := \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$$

Рис. 1 – призначення матриці t.

Додаємо відповідні дані способів виконання робіт з таблиці 1 у матриці a, b, c, що відповідають способу (рис. 2).

Норми часу технологій

$$a := \begin{bmatrix} 42.41 \\ 26.07 \\ 45.50 \\ 211 \\ 34.98 \\ 18.95 \\ 8.34 \\ 14.30 \\ 12.40 \end{bmatrix} \quad b := \begin{bmatrix} 50.99 \\ 31.28 \\ 45.50 \\ 211 \\ 34.98 \\ 18.95 \\ 11.66 \\ 14.30 \\ 12.40 \end{bmatrix} \quad c := \begin{bmatrix} 50.99 \\ 31.19 \\ 45.50 \\ 437.42 \\ 34.98 \\ 18.98 \\ 13.53 \\ 21.89 \\ 12.40 \end{bmatrix}$$

Рис. 2 – призначення матриць a, b, c

Задаємо нульові значення коефіцієнтів для кожного значення, де x відповідає a, y відповідає b, z відповідає c (рис. 3).

Попередні значення невідомих

$$x := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad y := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad z := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Рис. 3. призначення матриць x, y, z.

Цільовою функцією буде сума добутків значень та їх коефіцієнтів в межах технологічної підгрупи t (рис. 4).

Цільова функція

$$f(x, y, z) := \sum_{i=1}^t a_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^t b_i \cdot y_i + \sum_{i=1}^t c_i \cdot z_i$$

Рис. 4. призначення функції f(x, y, z), що буде цільовою

Загальними обмеженнями для пошуку мінімального значення цільової функції будуть значення коефіцієнтів більші за нуль (рис. 5).
Обмеження цільової функції

$$x > 0 \quad y > 0 \quad z > 0$$

Рис. 5. задавання обмежень x, y, z.

Оскільки може використовуватись лише один спосіб технологічної групи, то коефіцієнти однієї групи технологій є дихотомічними значеннями та їх сума має дорівнювати одиниці. Враховуючи, що перша група рахується з початку, немає необхідності введення нижньої межі обмежень i. Отже обмеження для першої групи технологій буде наступним (рис. 6).

1 група технологій

$$\sum_{i=1}^{t_1} x_i + \sum_{i=1}^{t_1} y_i + \sum_{i=1}^{t_1} z_i = 1$$

Рис. 6. задавання обмежень по першій групі технологій

Для обмежень другої групи технологій необхідно задати верхні і нижні межі i, тому введено змінну n, що відповідає за номер групи (рис. 7).

2 група технологій (n - номер групи)

$$n := 2$$

$$\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n z_i = 1$$

Рис. 7. задавання обмежень по другій групі технологій

Аналогічними є обмеження для третьої та четвертої груп (рис. 8).

3 група технологій

$$n := 3$$

$$\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n z_i = 1$$

4 група технологій

$$n := 4$$

$$\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n z_i = 1$$

Рис. 8. задавання обмежень по третій та четвертій групах технологій

Для вирішення задачі використовуємо функцію оптимізації minimize() цільової функції f з вхідними аргументами x, y, z, а матрицю з результатом збережемо в змінній s (рис. 9).

$$s := \text{minimize}(f, x, y, z)$$

Рис. 9. призначення змінній s результату функції оптимізації

Результатом функції оптимізації буде матриця з дихотомічними коефіцієнтами, де s1 відповідає x, s2 відповідає y, s3 відповідає z (рис. 10).

$$s_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad s_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad s_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Знаходимо суми коефіцієнтів по кожному способу всіх підгруп (рис. 11).

$$\sum s_1 = 4.00 \quad \sum s_2 = 0.00 \quad \sum s_3 = 0.00$$

Рис. 11. пошук сум коефіцієнтів

Підставивши отримані коефіцієнти в цільову функцію отримаємо мінімальне значення, що відповідає результату підбору оптимальної технологічної послідовності з таблиці 1 (рис. 12).

$$f(s_1, s_2, s_3) = 81.79$$

Рис. 12. знаходження результату цільової функції

Використання описаної структури в РТС Mathcad Prime може бути масштабоване для пошуку оптимальних технологічних послідовностей не тільки для окремих видів робіт, а й для циклу будівельного виробництва в цілому.

Збільшення критеріїв, таких як вартість робіт та витрати матеріалів для даної структури розрахунку також не є проблемою масштабування: в цільову функцію додаються добутками відповідні додаткові дані у відповідній залежності з попередньо створених масивів значень додаткових критеріїв.

Пошук оптимальних технологічних послідовностей засобами Microsoft365 Excel.

Для пошуку оптимальних послідовностей проведемо оцінку наявних даних засобами надбудови «Розв'язувач» табличного процесора Microsoft365 Excel.

Занесемо дані з таблиці 1 у таблицю Excel. Масиву a будуть відповідати чарунки із діапазоном С3:С11, масиву b будуть відповідати чарунки із діапазоном D3:D11, масиву c будуть відповідати чарунки із діапазоном E3:E11 (рис. 13).

Розмірності масивів коефіцієнтів x, y, z відповідають розмірності масивів даних a, b, c.

Масиву x відповідають чарунки J3:J11, масиву y відповідають чарунки K3:K11, масиву z відповідають чарунки L3:L11 (рис. 14).

Змінюючи значення в чарунках діапазону J3:L11 (x1:z9) ми отримаємо коефіцієнти цільової функції які мають наступні обмеження:

$$a_i \cdot x_i + b_i \cdot y_i + c_i \cdot z_i = 1, \quad (1)$$

	A	B	C	D	E
	№ з./п.	Назва технології	a з рихтувань	b з навісних систем	c з люльок
1					
2	1	2	3	4	5
3	1	1.1 Очищення вручну	42,41	50,13	50,99
4	2	1.2 Піскоструменевим апаратом	26,07	31,28	31,19
5	3	1.3 Гідроструменеве очищення	45,50	45,50	45,50
6	4	2.1 Ручне штукатурення	211,00	211,00	437,42
7	5	2.2 Механізоване	34,98	34,98	34,98
8	6	3.1 Ручне ґрунтування	18,95	18,95	18,95
9	7	3.2 Ґрунтування пульвелізатором	8,34	11,66	13,53
10	8	4.1 Ручне фарбування	14,30	14,30	21,89
11	9	4.2 Механізоване фарбування	12,40	12,40	12,40
12	Мінімальна сума оптимальних значень (цільова функція)				

Рис. 13. вхідні значення

	A	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	i (№ з./п.)	a · x	b · y	c · z	MIN	x з риштувань	y з навісних систем	z з люльок	x+y+z =	1	SUM 1-3, 4-5, 6-7, 8-9
1											
2	1	9	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	0
4	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
5	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
6	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	0
7	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
8	6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
9	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	0
10	8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
11	9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
12	Результат цільової функції				0,00	0	0	0			

Рис. 14. структура вихідних значень, де x, y та z відповідні коефіцієнти для a, b, c

де a, b, c – значення кожної з технологій;
 x, y, z - коефіцієнти для відповідних значень a, b, c;
 i – номер способу в технології;
 $\sum_{(i=1,3,4,5,6,7,8,9)} a_i \cdot x_i + b_i \cdot y_i + c_i \cdot z_i = 1, (2)$
 Цільова функція – сума всіх значень з відповідними коефіцієнтами
 $f(x, y, z) = \sum (a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z), (3)$
 Вносимо необхідні параметри в розв'язувач:
 Результат цільової функції: I12;
 Зміна коефіцієнтів x, y, z діапазон: J3:L11;
 Обмеження:
 O3=N3, O6=N6, O8=N8, O10=N10 – сума коефіцієнтів підгруп дорівнює одиниці.

J3:J11<=N3:N11, K3:K11<=N3:N11,
 L3:L11<=N3:N11 – кожен коефіцієнт мусить бути дихотомічним значенням, оскільки спосіб використовується або не використовується. Комбінування способів в межах технології не допускається. (рис. 15).
 Результатом роботи розв'язувача будуть знайдені коефіцієнти x, y, z в діапазоні чарунок J3:L11 та результат цільової функції в чарунці I12.
 Чарунки J12, K12 та L12 – контрольні суми коефіцієнтів x, y, z в межах J3:L11 відповідно (рис.16).
 Результат роботи розв'язувача Microsoft365 Excel повністю повторює результат PTC Mathcad Prime, однак масштабування моделі неможливе.

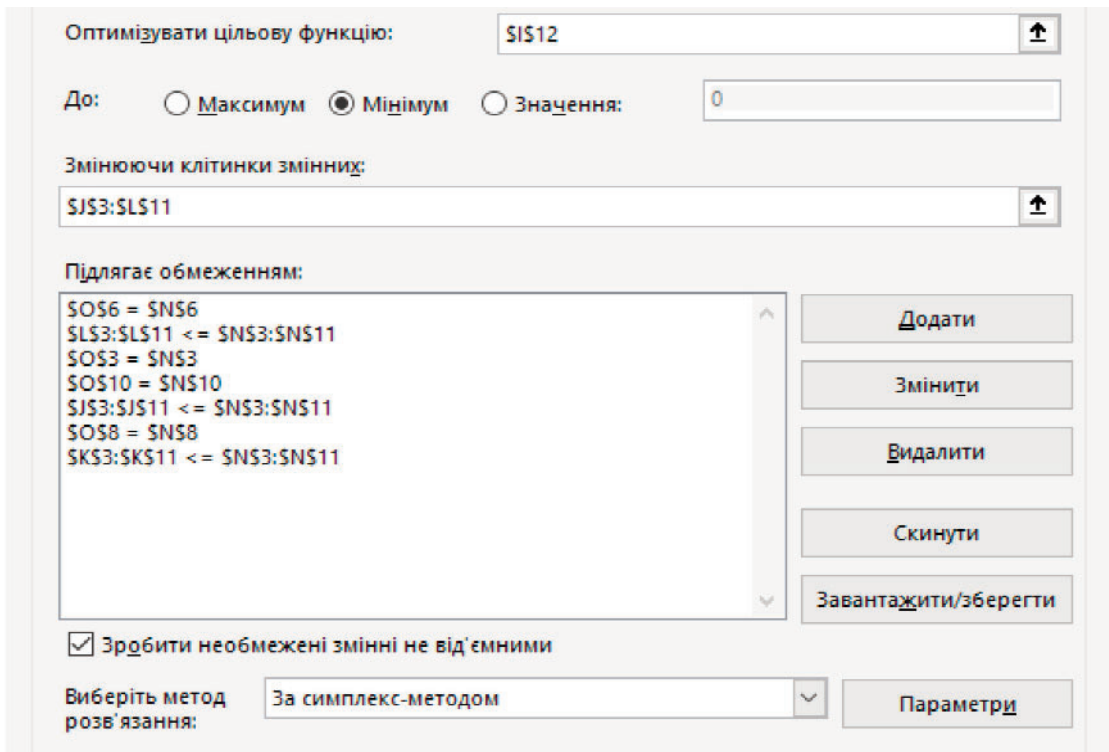


Рис. 15. внесення аргументів у розв'язувач

	A	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	i (№ з./п.)	a · x	b · y	c · z	MIN	x з рихтувань	y з навісних систем	z з люльок	x+y+z =	1	SUM 1-3, 4-5, 6-7, 8-9
1											
2	1	9	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	1
4	2	26,07	0,00	0,00	26,07	1,000	0,000	0,000	1,00	1	
5	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
6	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
7	5	34,98	0,00	0,00	34,98	1,000	0,000	0,000	1,00	1	
8	6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
9	7	8,34	0,00	0,00	8,34	1,000	0,000	0,000	1,00	1	
10	8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	1	
11	9	12,40	0,00	0,00	12,40	1,000	0,000	0,000	1,00	1	
12	Результат цільової функції				81,79	4	0	0			

Рис. 16. результат роботи розв'язувача

Будь-яке змінення структури (збільшення або зменшення) призведе до необхідності коригування цільової функції та встановленні нових обмежень по групам аналізу даних, що при великій кількості груп може призвести до технічних помилок та неправильного розв'язання задачі.

Пошук оптимальних технологічних послідовностей ранжуванням даних.

Вище представлені рішення є достатньо простим засобом пошуку оптимізації в будівельному виробництві, що можуть бути автоматизовані засобами обчислювальної техніки. Нажаль вказані методи не можуть надати інформацію щодо рейтингу технологічних послідовностей та надати можливість обрати декілька з них для порівнянь на рівні технологічної карти. Оптимальним методом аналізу рейтингу буде використання рангової системи аналізу даних. Крім того, простота рангової системи дозволяє використати її без залучення обчислювальної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення.

Застосовуємо систему рангів для оцінки технологій

використовуючи округлену норму часу від 1 до 100 відносно максимальної трудомісткості по групі технологій.

Розрахунок рангу виконується за наступною формулою:

$$G_j = \left[\frac{X_{i \in G_j}}{\max\{X_{i \in G_j}\}} \cdot 100 \right], \tag{4}$$

де $G_{1..a}$ – послідовність групи технологій;

$X_{1..n}$ – трудомісткість технології виконання робіт $X_i \in G_j$;

Y_i – ранг за розрахунком $Y_i \in G_j$;

i – номер способу в групі;

j – номер технологічної групи;

Середній ранг по групі технологій розраховується за формулою:

$$Z_{i \in G_j} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n Y_{i \in G_j}}{n} \right], \tag{5}$$

де Z_n – середній бал по технології;

n – кількість технологій в групі;

Результати заносимо в масив даних таблиці 2.

Отримані результати занесемо в таблицю 3.

Таблиця 2.

Масив даних

N	G	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Z
1	1	42,41	53,13	50,99	80	100	96	92
2	1	26,07	33,28	31,19	49	63	59	57
3	1	45,5	45,5	45,5	86	86	86	86
1	2	211	211	437,42	48	48	100	65
2	2	34,98	34,98	34,98	8	8	8	8
1	3	18,95	18,95	18,95	100	100	100	100
2	3	8,34	11,66	13,53	44	62	71	59
1	4	14,3	14,3	21,89	65	65	100	77
2	4	12,4	12,4	12,4	57	57	57	57

Ранжування підгруп даних

№з./п.	Назва технології	Ранг по способу виконання робіт			Середній ранг
		З землі та риштувань	З драбин або навісних систем	З люльок	
1	2	3	4	5	6
1. Технології очистки фасаду					
1.1	Очищення вручну	80	100	96	92
1.2	Піскоструменевим апаратом	49	63	59	57
1.3	Гідроструменеве очищення	86	86	86	86
2. Технології штукатурення поверхні					
2.1	Ручне штукатурення	48	48	100	65
2.2	Механізоване	8	8	8	8
3. Технології ґрунтування поверхні					
3.1	Ручне ґрунтування	100	100	100	100
3.2	Ґрунтування пульвелізатором	44	62	71	59
4. Технології фарбування поверхні					
4.1	Ручне фарбування	65	65	100	77
4.2	Механізоване фарбування	57	57	57	57

Найменший ранг означає найскоріше виконання робіт за технологією.

Обираємо та залишимо лише технологію з найменшим рангом.

За сумою балів визначимо кращу технологічну послідовність.

Розрахунок за формулою:

$$R_i = \sum_{j=1}^a Z_j \in G_j, \quad (6)$$

Де, R_i – сума балів технологічної послідовності.

Z_j – середній ранг по технології в групі $Z_j \in G_j$;

a – кількість технологічних груп.

Запишемо результат у таблицю 4.

Таблиця 4.

Ранжування послідовностей

№ технології	Назва технології	Ранг по способу виконання робіт		
		З землі та риштувань	З драбин або навісних систем	З люльок
1	2	3	4	5
1. Технології очистки фасаду				
1.1	Піскоструменевим апаратом	26	31	31
2. Технології штукатурення поверхні				
2.2	Механізоване	34	34	34
3. Технології ґрунтування поверхні				
3.2	Ґрунтування пульвелізатором	8	11	13
4. Технології фарбування поверхні				
4.2	Механізоване фарбування	12	12	12
Сума рангів		80	88	90

Найкращими технологічними послідовностями для виконання вищевказаних оздоблювальних робіт є технологічна послідовність виконання робіт землі та риштувань, альтернативна може бути технологічна послідовність виконання робіт з землі та навісних систем.

Висновки.

У даній статті була розглянута задача оптиміза-

ції організації будівництва, яка може бути вирішена методом лінійного програмування, та ранжуванням даних. Детально розглянуто рішення завдання різними програмними засобами. Знайдено оптимальні технологічні послідовності виконання робіт за допомогою РТС Mathcad Prime, Microsoft 365 Excel та ранжуванням даних. При порівнянні цих методів, більш точний результат дає РТС Mathcad Prime, по котрим і отримано рейтинги технологічних послідовностей.

Література

1. Papadaki I.N., Chassiakos A.P. Multi-objective construction site layout planning using genetic algorithms // *Procedia Engineering*. 2016. №164. pp. 20-27.
2. Ning X., Qi J., Wu C., Wang W. Reducing noise pollution by planning construction site layout via a multi-objective optimization model // *Journal of Cleaner Production*. 2019. №222. pp. 218-230.
3. Hammad A.W.A., Rey A.D. A multi-objective mixed integer nonlinear programming model for construction site layout to minimize noise pollution and transport costs // *Automation in Construction*. 2016. №61. pp. 73-85.
4. Чирас А.А. *Строительная механика*. Москва: Стройиздат, 1989. 256 с.
5. Чирас А.А., Боркаускас А.Э., Каркаускас Р.П. *Теория и методы оптимизации упруго-пластических систем*. Л.: Стройиздат, 1974. 279 с.
6. Чирас А.А. *Математические модели анализа и оптимизации упруго-пластических систем*. Вильнюс, Мокслас, 1982. 112 с.
7. Suworov A.P., Dvorak G.J. Optimized fiber prestress for reduction of free edge stresses in composite laminates // *International Journal of Solids and Structures*. 2001. №38. pp. 6751-6786.
8. Попов Ю.Д. *Методи оптимізації. Навчальний електронний посібник для студентів спеціальностей "Прикладна математика", "Інформатика", "Соціальна інформатика"* / Ю.Д. Попов, В.І. Тюптя, В.І. Шевченко – К.: Електронне видання. Ел. бібліотека ф-ту кібернетики КНУ імені Тараса Шевченка, 2003. 215 с.
9. Григорків В.С. *Практикум з математичного програмування: Учебний посібник для студентів економічних спеціальностей вузів* / В.С. Григорків, М.В. Бойчук. – Чернівці: Прут, 1995. – 244 с.
10. Деордица Ю.С. *Исследование операций в планировании и управлении* / Ю.С. Деордица, Ю.М. Нефедов. – Киев: Вища школа, 1991. – 212 с.
11. Жалдак М. І. *Основи теорії і методів оптимізації : навч. посіб.* / М. І. Жалдак, Ю. В. Триус. – Черкаси : Брама-Україна, 2005. – 608 с.
12. Українець А. І. *Задачі лінійного та нелінійного програмування: навч. посібник* / А. І. Українець, А. М. Гуржій, В. В. Самсонов та ін. – К.: НУХТ, 2007. – 208 с.

References

1. Papadaki I.N., Chassiakos A.P. Multi-objective construction site layout planning using genetic algorithms // *Procedia Engineering*. 2016. №164. pp. 20-27.
2. Ning X., Qi J., Wu C., Wang W. Reducing noise pollution by planning construction site layout via a multi-objective optimization model // *Journal of Cleaner Production*. 2019. №222. pp. 218-230.
3. Hammad A.W.A., Rey A.D. A multi-objective mixed integer nonlinear programming model for construction site layout to minimize noise pollution and transport costs // *Automation in Construction*. 2016. №61. pp. 73-85.
4. Chyras A.A. *Stroytelnaia mekhanika*. Moskva: Stroyizdat, 1989. 256 s.
5. Chyras A.A., Borkauskas A.Э., Karkauskas R.P. *Teoriya y metody optimizatsyy upruho-plastycheskykh system*. L.: Stroyizdat, 1974. 279 s.
6. Chyras A.A. *Matematycheskiye modeli analiza y optimizatsyy upruho-plastycheskykh system*. Vylnius, Mokslas, 1982. 112 s.
7. Suworov A.P., Dvorak G.J. Optimized fiber prestress for reduction of free edge stresses in composite laminates // *International Journal of Solids and Structures*. 2001. №38. pp. 6751-6786.
8. Попов Ю.Д. *Metody optimizatsii. Navchalnyi elektronnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti "Prykladna matematyka", "Informatyka", "Sotsialna informatyka"* / Yu.D. Popov, V.I. Tuptia, V.I. Shevchenko – K.: Elektronne vydannia. El. biblioteka f-tu kibernetiky KNU imeni Tarasa Shevchenka, 2003. 215 s.
9. Hryhorkiv V.S. *Praktykum z matematychnoho prohramuvannia: Uchbovyi posibnyk dlia studentiv ekonomichnykh spetsialnosti vuziv* / V.S. Hryhorkiv, M.V. Boichuk. – Chernivtsi: Prut, 1995. – 244 s.
10. Deordytsa Yu.S. *Yssledovanye operatsyi v planirovaniy u upravleniyu* / Yu.S. Deordytsa, Yu.M. Nefedov. – Kyev: Vyshcha shkola, 1991. – 212 s.
11. Zhaldak M. I. *Osnovy teorii i metodiv optimizatsii : navch. posib.* / M. I. Zhaldak, Yu. V. Tryus. – Cherkasy : Brahma-Ukraina, 2005. – 608 s.
12. Ukrainets A. I. *Zadachi liniinoho ta neliniinoho prohramuvannia: navch. posibnyk* / A. I. Ukrainets, A. M. Hurzhii, V. V. Samsonov ta in. – K.: NUKhT, 2007. – 208 s.

¹ **V.O. Halushko**, Doctor of Technical Sciences, Prof. of the Department of Building Structures, Buildings and Structures, DonNaba, ORCID 0000-0001-5744-0486;

² **D. Yu. Uvarov**, graduate student of the Department of TBV, ODABA, head of the design department of LLC UPS FORT. ORCID: 0000-0002-3591-342X;

³ **A.S. Uvarova**, student of the . ORCID: 0000-0002-1416-7181

¹ Donbas National Academy of Construction and Architecture

² Odesa State Academy of Construction and Architecture, Odesa

³ Khortitsky Educational and Rehabilitation Academy, Zaporiggia

RESEARCH OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL SEQUENCES IN THE ORGANIZATION OF CONSTRUCTION PRODUCTION

Abstract. *The article discusses some problems of economics and organization of construction, which can be solved by linear programming using PTC Mathcad Prime, Excel Microsoft365 and data ranking. The authors analyzed the literature, which presents the existing optimization methods in various industries and the field of construction production. Shows the basic principles of using linear programming in various software tools. The authors analyzed in detail the comparison of different methods for the selection of optimal technological sequences. Examples of solving optimization problems in construction production by means of linear programming and data ranking method are presented. To solve the problem, the technology of applying the mixture to a vertical surface was used. Namely: cleaning the facade, plastering the surface, painting the surface. Three technologies were considered. For applying to a vertical surface using standard equipment are scaffolding, ladders and cradles. The process flow consists of the following processes: This is surface preparation. It can be performed in three ways: manual cleaning, sandblasting apparatus, hydrojetting. The next process is the technology of plastering the surface. At this stage, two options are considered: manual plastering and mechanized plaster application. Next, you perform a surface grouping process. This process can be performed either manually or using a pulverizer. And the last process is painting the surface. Considered manual painting or mechanized device. The next step was to analyze the possibilities of each of the optimization search methods and provide recommendations for their possible application in solving similar problems. Created a mathematical model that can be scaled to implement optimization search in groups of technological sequences with different methods of work. Conclusions were also made regarding the use of the presented methods in solving similar problems of construction production.*

This article may be an analog for calculating not only the mechanization processes, but it may become a meeting for automating the construction processes.

Keywords: *linear programming, optimisation method, technological processes for finishing jobs.*