

УДК 69.003:69.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2024.45.12>**Філіппов О.В.**

аспірант кафедри організація і управління будівництвом

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ORCID: 0000-0002-4601-1966

**Распутний Д.С.**

аспірант кафедри економіки будівництва,

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ORCID: 0009-0000-2464-2313

**ЦИФРОВИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ БУДІВНИЦТВА  
НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН**

***Анотація.** Стаття присвячена розробленню та обґрунтуванню цифрового інструментарію управління якістю будівництва на основі теорії нечітких множин на прикладі малярних робіт із різними проектними вимогами до якості. Актуальність дослідження зумовлена зростанням складності будівельних процесів, підвищенням вимог замовників до якості оздоблювальних робіт і необхідністю прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності, варіативності технологій і суб'єктивності експертних оцінок. Традиційні детерміновані підходи до оцінювання якості не в повній мірі враховують нечіткий характер показників трудомісткості, ресурсного забезпечення та організаційно-технологічних факторів.*

*У роботі здійснено статистичний аналіз описових характеристик основних факторів якості малярних робіт, елементними кошторисними нормами яких ураховано проектні вимоги до оформлення поверхонь. На основі результатів двохвибіркових тестів рівності середніх доведено наявність статистично значущих відмінностей між простим, поліпшеним і високоякісним фарбуванням за трудомісткістю, середнім розрядом робіт та матеріаломісткістю. Установлено, що саме трудомісткість є інтегральним показником, чутливим до зміни рівня якості та доцільним для використання як цільової змінної в аналітичних моделях.*

*Побудовано регресійні залежності, які кількісно описують вплив матеріальної складової на трудові витрати, а також запропоновано підхід до формування зон очікуваної трудомісткості з використанням нечітких чисел і зрізів. Для простого та високоякісного фарбування розроблено двофакторні моделі, просторову інтерпретацію яких адаптовано до площинного подання з метою практичного застосування в системах управління якістю. Запропоновано алгоритм використання моделей на базі календарних графіків і фактичних виробничих даних для оцінювання міри прийняття фактичної трудомісткості щодо усереднено-нормативних значень.*

*Отримані результати підтверджують доцільність поєднання статистичних методів аналізу з апаратом теорії нечітких множин у цифрових системах управління якістю будівництва та створюють методичне підґрунтя для впровадження адаптивних, орієнтованих на умови невизначеності, інструментів підтримки управлінських рішень.*

**Ключові слова:** управління якістю будівництва, трудомісткість, матеріаломісткість, кореляційно-регресійний аналіз, методи нечітких множин, організаційно-методичний інструментарій, якість, оцінка відповідності, BIM-технології, цифровізація, економіко-математичні методи, цифрова трансформація, будівництво, економіка будівництва, організація будівництва.

**Постановка проблеми.** Умови реалізації будівельних проектів відзначаються наявністю значної невизначеності і суб'єктивних факторів, пов'язаних із впливом людського

чинника, варіативністю технологічних процесів, змінами зовнішнього середовища та неоднозначністю експертних оцінок якості виконання робіт. Традиційні методи управ-

ління та оцінювання якості, які ґрунтуються переважно на детермінованих підходах і жорстко фіксованих нормативних показниках, не завжди дозволяють адекватно врахувати ці особливості й забезпечити обґрунтованість управлінських рішень у динамічних умовах будівельного виробництва.

Цифровізація відкриває нові можливості для формування інтегрованих систем управління якістю, що базуються на використанні інформаційних моделей, автоматизованого збору даних і аналітичних інструментів, проте ефективність таких систем значною мірою залежить від здатності коректно обробляти нечітку, неповну або якісно описану інформацію. У цьому контексті теорія нечітких множин є доцільною науково-методологічною основою для створення цифрового інструментарію управління якістю будівництва, оскільки вона дозволяє формалізувати експертні судження, лінгвістичні оцінки та нечіткі критерії, характерні для контролю й оцінювання будівельних процесів та результатів. Поєднання цифрових технологій з апаратом нечіткої логіки сприяє підвищенню гнучкості, адаптивності та об'єктивності систем управління якістю, а також створює передумови для переходу від реактивного контролю до активного прогнозного управління.

Таким чином, розробка та обґрунтування цифрового інструментарію управління якістю будівництва на основі теорії нечітких множин є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого відповідає сучасним викликам галузі, сприяє підвищенню конкурентоспроможності будівельних організацій і забезпеченню сталого розвитку будівельного виробництва в умовах цифрової трансформації.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У сучасних наукових дослідженнях оцінювання якості будівництва розглядається як комплексний процес, що охоплює технічні, організаційні, технологічні та інформаційні аспекти протягом усього життєвого циклу об'єкта. Значна увага приділяється цифровим підходам, зокрема інтеграції BIM-технологій та хмарних обчислень, які забезпечують об'єктивність і безперервність контролю якості на етапі виконання будівельних робіт завдяки централізованому управлінню даними, оперативному фіксуванню відхилень і можливості порівняння фактичних показників із проєктними та нормативними значеннями

[1; 3]. У контексті розвитку Industry 4.0 оцінювання якості будівництва дедалі більше спирається на цифрові платформи, що поєднують BIM, сенсорні системи, інтелектуальний аналіз даних та автоматизований моніторинг, що дозволяє перейти від вибіркового контролю до постійного вимірювання показників якості й прогнозування потенційних дефектів [2; 9]. Поряд із цим зберігають актуальність традиційні підходи до оцінювання якості, засновані на системах забезпечення та контролю якості (QA/QC), регламентованих перевірок, технічній документації та застосуванні класичних інструментів статистичного контролю, які дають змогу кількісно оцінювати стабільність і відповідність будівельних процесів установленим вимогам [4; 8]. Важливу роль у системі оцінювання якості відіграє аналіз дефектів будівельних робіт, який розглядається не лише як фіксація невідповідностей, а як інструмент зворотного зв'язку для вдосконалення проєктних рішень, технологій виконання та організації будівництва, що особливо актуально для оздоблювальних і завершальних робіт, чутливих до умов виконання та експлуатації [6]. Фундаментальні наукові праці зосереджують увагу на організаційно-технологічних та економічних аспектах оцінювання якості, підкреслюючи, що рівень якості будівельної продукції є результатом узгодженої дії управлінських рішень, технологічної дисципліни, ресурсного забезпечення та системи техніко-економічних показників, за допомогою яких здійснюється узагальнена оцінка ефективності будівельного виробництва [5; 7; 10; 11; 12]. Загалом аналіз сучасних джерел свідчить, що оцінювання якості будівництва еволюціонує від переважно контрольних функцій до інтегрованої системи аналітичного та прогнозного характеру, у якій поєднуються традиційні методи контролю й сучасні цифрові технології, що забезпечує підвищення об'єктивності, точності та обґрунтованості управлінських рішень у будівельній галузі [1–12].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У таблиці 1 наведено результати описової статистики основних факторів, що характеризують якість будівельної продукції для малярних робіт, виконаних відповідно до елементних кошторисних норм із урахуванням проєктних вимог до оформлення поверхонь. Аналіз здійснено окремо для простого, поліпшеного та високоякісного фарбування,

Таблиця 1. Описові статистики основних факторів якості будівельної продукції для малярних робіт, елементними кошторисними нормами яких враховано проектні вимоги до оформлення поверхонь

Характеристика будівельних робіт	Інтервальна оцінка середнього	Межі надійного інтервалу середнього		Розмах варіації		Квартилі		Стандартне відхилення	Коефіцієнт асиметрії	Коефіцієнт варіації
		ліва	права	мінімум	максимум	1-й	3-й			
Кількість основних і допоміжних операцій	3.77±0.212	3.56	3.98	3.00	7.00	3.00	4.00	0.94	24.90	2.13
Середній розряд робіт	3.42±0.021	3.40	3.44	3.10	3.50	3.40	3.50	0.09	2.66	-1.96
<b>Витрати труда робітників-будівельників, люд.год</b>	<b>70.83±8.237</b>	<b>62.59</b>	<b>79.07</b>	<b>10.84</b>	<b>171.3</b>	<b>43.8</b>	<b>94.9</b>	<b>36,53</b>	<b>51.57</b>	<b>0.57</b>
Маса будівельних матеріалів, виробів, комплектів, т	0.03±0.008	0.03	0.04	0.01	0.26	0.02	0.04	0,04	102.25	4.46
Номенклатура будівельних матеріалів, виробів, комплектів, од.	5.04±0.303	4.74	5.34	2.00	6.00	4.0	6.0	1,34	26.66	-1.06
Полішене фарбування, 69 видів робіт										
Кількість основних і допоміжних операцій	11.64±0.457	11.18	12.09	3.00	14.00	12.00	12.00	1,94	16.34	-4.20
Середній розряд робіт	3.53±0.026	3.51	3.56	3.30	3.80	3.50	3.50	0,11	3.09	1.77
<b>Витрати труда робітників-будівельників, люд.год</b>	<b>129.25±19.415</b>	<b>109.8</b>	<b>148.66</b>	<b>18.23</b>	<b>346.1</b>	<b>68.49</b>	<b>166.1</b>	<b>81,94</b>	<b>62.53</b>	<b>0.99</b>
Маса будівельних матеріалів, виробів, комплектів, т	0.05±0.006	0.04	0.06	0.02	0.12	0.03	0.07	0,03	52.30	0.98
Номенклатура будівельних матеріалів, виробів, комплектів, од.	5.55±0.168	5.38	5.71	4.00	6.00	5.00	6.00	0,68	12.32	-1.21
Високоякісне фарбування, 50 видів робіт										
Кількість основних і допоміжних операцій	12.16±0.894	11.27	13.05	3.00	16.00	13.00	13.00	3,15	25.87	-2.52
Середній розряд робіт	4.03±0.036	3.99	4.07	3.50	4.30	4.00	4.00	0,12	3.10	-0.34
<b>Витрати труда робітників-будівельників, люд.год</b>	<b>198.82±32.716</b>	<b>166.11</b>	<b>231.54</b>	<b>16.18</b>	<b>489.1</b>	<b>118.5</b>	<b>268.4</b>	<b>115,12</b>	<b>57.90</b>	<b>0.53</b>
Маса будівельних матеріалів, виробів, комплектів, т	0.07±0.01	0.06	0.08	0.02	0.16	0.04	0.10	0,04	50.25	0.47
Номенклатура будівельних матеріалів, виробів, комплектів, од.	5.46±0.224	5.24	5.68	4.00	6.00	5.00	6.00	0,79	14.43	-1.04

Розроблено автором

що дозволяє простежити кількісні відмінності показників якості залежно від рівня складності та вимог до кінцевого результату.

Для простого фарбування, представленого 78 видами робіт, встановлено, що кількість основних і допоміжних операцій характеризується невеликим середнім значенням та помірною варіативністю, що відображає відносно просту технологічну структуру робіт. Вузькі межі довірчого інтервалу середнього для показника середнього розряду робіт та низький коефіцієнт варіації свідчать про стабільні кваліфікаційні вимоги до виконавців. Водночас витрати праці й маса будівельних матеріалів характеризуються значним розмахом варіації та підвищеними значеннями коефіцієнтів варіації, що вказує на істотний вплив конкретних умов виконання робіт і різноманіття нормативних рішень. Переважно додатні значення коефіцієнта асиметрії для більшості показників відображають наявність окремих трудомістких або матеріаломістких варіантів у сукупності спостережень.

Для поліпшеного фарбування, яке охоплює 69 видів робіт, характерним є суттєве зростання кількості технологічних операцій і трудомісткості порівняно з простим фарбуванням. При цьому міжквартильні інтервали для кількості операцій є вкрай вузькими, що свідчить про високий ступінь стандартизації технологічних процесів. Показник середнього розряду робіт демонструє помірне зростання та зберігає низьку дисперсію, що відображає стабільні вимоги до кваліфікації персоналу за підвищеного рівня якості. Витрати праці мають значні значення стандартного відхилення та коефіцієнта варіації, що свідчить про неоднорідність трудових витрат навіть за близьких технологічних схем. Маса та номенклатура будівельних матеріалів характеризуються помірною варіабельністю та, переважно, лівосторонньою асиметрією, що вказує на концентрацію значень у межах типових рішень.

Для високоякісного фарбування, представленого 50 видами робіт, зафіксовано максимальні середні значення кількості операцій, середнього розряду робіт і витрат праці, що відображає підвищені вимоги до технології виконання та професійної підготовки виконавців. Водночас значний розмах варіації та підвищені коефіцієнти варіації для кількості операцій і витрат праці свідчать про істотну різноманітність технологічних рішень і рівня

деталізації робіт у межах цієї групи. Показники маси та номенклатури матеріалів мають відносно стабільний характер, що підтверджується помірними значеннями стандартного відхилення та коефіцієнтів варіації, а також незначною асиметрією розподілів.

Загалом результати, наведені в таблиці 1, підтверджують закономірне зростання складності, трудомісткості та кваліфікаційних вимог у міру підвищення рівня якості малярних робіт, а також наявність істотної варіативності окремих факторів якості. Це підкреслює доцільність використання узагальнених статистичних характеристик у поєднанні з більш гнучкими методами оцінювання для підтримки управлінських рішень у сфері контролю якості будівельної продукції.

У табл. 2 наведено результати двохвибіркового t-тесту рівності середніх значень основних характеристик малярних робіт для різних рівнів проектних вимог до якості, що дає змогу кількісно оцінити статистичну значущість відмінностей між відповідними сукупностями робіт.

Порівняння поліпшеного та високоякісного фарбування показує, що для показника кількості основних і допоміжних операцій різниця між середніми значеннями є статистично незначущою ( $t = 1,125$ ;  $p = 0,263$ ), що свідчить про близьку структуру технологічних процесів за цими двома рівнями якості. Натомість середній розряд робіт характеризується вкрай високою статистично значущою різницею ( $t = 23,117$ ;  $p < 0,001$ ), що вказує на суттєве підвищення кваліфікаційних вимог до виконавців у разі високоякісного фарбування. Аналогічно, витрати праці, а також маса будівельних матеріалів демонструють статистично значущі відмінності ( $p < 0,001$ ), що підтверджує істотне зростання трудомісткості й матеріаломісткості робіт із підвищенням проектних вимог. Водночас номенклатура будівельних матеріалів не виявляє статистично значущої різниці ( $p = 0,534$ ), що свідчить про використання порівняно однакового набору матеріалів для обох рівнів якості.

Результати порівняння простого та поліпшеного фарбування засвідчують наявність статистично значущих відмінностей за всіма розглянутими показниками. Значення t-критерію для витрат праці, маси матеріалів, номенклатури матеріалів, кількості операцій і середнього розряду робіт є високими за абсолютною величиною, а імовірність помилки

Таблиця 2. Результати двохвибіркового тесту рівності середніх для характеристик малярних робіт із різними проектними вимогами до якості

Показник	Нижчий рівень якості: Полішене фарбування, n <sub>1</sub> =69 видів робіт		Вищий рівень якості: Високоякісне фарбування, n <sub>2</sub> =50 видів робіт		t-критерій значимості розбіжностей вибірових середніх $t^* = \frac{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \cdot \frac{(n_1 - 1) \cdot S_{x_1}^2 + (n_2 - 1) \cdot S_{x_2}^2}{n_1 + n_2 - 2}}{\sqrt{(x_1 - x_2)}}$	Імовірність помилки 1-го роду, р (при числі ступенів волі 145)
	Середнє значення x <sub>1</sub>	Стандартне відхилення S <sub>x<sub>1</sub></sub>	Середнє значення x <sub>2</sub>	Стандартне відхилення S <sub>x<sub>2</sub></sub>		
1	2	3	4	5	6	7
Кількість основних і допоміжних операцій	11.6377	1.90179	12.1600	3.1452	1.125	0.262723
Середній розряд робіт	3.5319	0.10913	4.0300	0.1249	23.117	0.000000
Витрати труда робітників-будівельників, люд.год	129.2491	80.81928	198.8238	115.1191	3.875	0.000176
Маса будівельних матеріалів, виробів, комплектів, т	0.0500	0.02616	0.0725	0.0364	3.870	0.000182
Номенклатура будівельних матеріалів, виробів, комплектів, од.	5.5455	0.68347	5.4600	0.7879	-0.624	0.533745
Кількість основних і допоміжних операцій	Нижчий рівень якості: Просте фарбування, n <sub>1</sub> =78 видів робіт		Вищий рівень якості: Полішене фарбування, n <sub>1</sub> =69 видів робіт		t-критерій значимості розбіжностей вибірових середніх $t^* = \frac{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \cdot \frac{(n_1 - 1) \cdot S_{x_1}^2 + (n_2 - 1) \cdot S_{x_2}^2}{n_1 + n_2 - 2}}{\sqrt{(x_1 - x_2)}}$	Імовірність помилки 1-го роду, р (при числі ступенів волі 117)
Середній розряд робіт	Середнє значення x <sub>1</sub>	Стандартне відхилення S <sub>x<sub>1</sub></sub>	Середнє значення x <sub>2</sub>	Стандартне відхилення S <sub>x<sub>2</sub></sub>		
Витрати труда робітників-будівельників, люд.год	3.76923	0.93868	11.6377	1.90179	-32.3644	0.000000
Маса будівельних матеріалів, виробів, комплектів, т	3.42308	0.09106	3.5319	0.10913	-6.5875	0.000000
Номенклатура будівельних матеріалів, виробів, комплектів, тів, од.	70.83128	36.53122	129.2491	80.81928	-5.7555	0.000000
Кількість основних і допоміжних операцій	0.03473	0.03551	0.0500	0.02616	-2.8953	0.004387
Середній розряд робіт	5.03846	1.34302	5.5455	0.68347	-2.7767	0.006234

Продовження таблиці 2

1	2		3		4	5
Показник	Нижчий рівень якості: Просте фарбування, n <sub>1</sub> = 78 видів робіт		Вищий рівень якості: Високоякісне фарбування, n <sub>2</sub> = 50 видів робіт		t-критерій значимості розбіжностей вибірових середніх	Імовірність помилки 1-го роду, р (при числі ступенів волі 126
	Середнє значення $\bar{x}_1$	Стандартне відхилення $S_{x_1}$	Середнє значення $\bar{x}_2$	Стандартне відхилення $S_{x_2}$	$t^* = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \cdot \frac{(n_1 - 1) \cdot S_{x_1}^2 + (n_2 - 1) \cdot S_{x_2}^2}{n_1 + n_2 - 2}}}$	
Кількість основних і допоміжних операцій	3.76923	0.93868	12.1600	3.1452		
Середній розряд робіт	3.42308	0.09106	4.0300	0.1249	31.74285	0.000000
Витрати труда робітників-будівельників, люд.год	70.83128	36.53122	198.8238	115.1191	9.14433	0.000000
Маса будівельних матеріалів, виробів, комплектів, т	0.03473	0.03551	0.0725	0.0364	5.81311	0.000000
Номенклатура будівельних матеріалів, виробів, комплектів, од.	5.03846	1.34302	5.4600	0.7879	2.00731	0.046856

Розроблено автором

першого роду близька до нуля ( $p < 0,01$ ). Це означає, що перехід від простого до поліпшеного фарбування супроводжується системним і статистично доведеним зростанням складності технологічних процесів, трудових витрат, вимог до кваліфікації персоналу та ресурсного забезпечення.

Найбільш контрастні відмінності зафіксовано під час порівняння простого та високоякісного фарбування. Для всіх показників отримано статистично значущі результати з імовірністю помилки першого роду, що не перевищує 0,05, а у більшості випадків наближається до нуля. Особливо високі значення  $t$ -критерію спостерігаються для середнього розряду робіт, кількості операцій і витрат праці, що свідчить про багаторазове зростання вимог до організації та технології виконання робіт за умов високоякісного фарбування. Також статистично підтверджено зростання маси використаних матеріалів і розширення їх номенклатури, хоча різниця за останнім показником є менш різкою порівняно з іншими характеристиками.

Загалом результати двохвибіркового тесту рівності середніх переконливо доводять, що підвищення проектних вимог до якості малярних робіт супроводжується статистично значущими змінами ключових характеристик будівельних процесів. При цьому найбільш значущими маркерами підвищення якості є середній розряд робіт і витрати праці, тоді як номенклатура матеріалів у ряді випадків залишається відносно стабільною. Отримані результати підтверджують доцільність диференційованого підходу до оцінювання та управління якістю малярних робіт залежно від рівня проектних вимог та створюють методичне підґрунтя для подальшого використання математичних і інтелектуальних методів у системах управління якістю будівництва.

Отримане в результаті кореляційно-регресійного аналізу рівняння описує кількісний зв'язок між показником трудових витрат на виконання малярних робіт  $Троб$  та фактором матеріальної складової робіт  $Кмат$  і дозволяє оцінити характер та силу впливу останнього на результативну ознаку.

$$Троб = (-119,584 \pm 77,530)_{(t=-1,542, p=0,128)} + (45,247 \pm 13,877)_{(t=3,260, p=0,002)} \cdot Кмат \quad (1)$$

Значення вільного члена є від'ємним і статистично незначущим ( $t = -1,542$ ;  $p = 0,128$ ), що свідчить про відсутність самостійного практичного змісту цього параметра

поза інтервалом спостережуваних значень пояснювальної змінної. Натомість коефіцієнт при змінній  $Кмат$  є додатним і статистично значущим на рівні значущості 0,05 ( $t = 3,260$ ;  $p = 0,002$ ), що підтверджує наявність прямого впливу матеріальної складової на величину трудових витрат. З практичної точки зору це означає, що зі збільшенням значення показника  $Кмат$  трудомісткість малярних робіт зростає, що відображає ускладнення технології виконання та підвищені вимоги до якості поверхонь.

Стандартизоване регресійне рівняння дозволяє порівняти силу впливу факторів у безрозмірному вигляді.

$$Троб = (0,377 \pm 0,116) \cdot Кмат \quad (2)$$

Значення стандартизованого коефіцієнта 0,377 свідчить про помірний позитивний зв'язок між змінними: збільшення  $Кмат$  на одне стандартне відхилення зумовлює зростання трудових витрат приблизно на 0,38 стандартного відхилення. Це підтверджує, що матеріальна складова є вагомим, але не єдиним фактором формування трудомісткості малярних робіт.

Достовірність апроксимації, оцінена коефіцієнтом детермінації  $R^2=0,129$ , показує, що модель пояснює близько 12,9 % варіації результативного показника. Такий рівень пояснювальної здатності є відносно невисоким і вказує на наявність інших суттєвих факторів, які впливають на трудові витрати та не були включені до моделі. Разом із тим значення коефіцієнта Фішера  $F=10,631$   $F = 10,631$  свідчить про загальну статистичну значущість регресійної моделі, що підтверджує доцільність її використання для аналітичних оцінок.

Стандартна помилка регресії, що становить 76,469, характеризує середній розмір відхилень фактичних значень трудових витрат від розрахункових і відображає точність прогнозування в межах наявної вибірки. У сукупності отримані показники дозволяють зробити висновок, що побудоване рівняння адекватно відображає загальну тенденцію впливу матеріальної складової на трудомісткість малярних робіт, однак потребує розширення за рахунок включення додаткових факторів для підвищення пояснювальної та прогностичної спроможності в контексті управління якістю будівельних процесів.

Регресійні залежності пропонується розглядати у вигляді нечітких чисел, що відо-

бражає відсутність чіткої залежності між факторами. У символічному вигляді для внутрішнього нечіткого числа фактори регресійних залежностей матимуть вигляд добутків, параметри яких обчислюються згідно правил множення нечітких чисел у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \widetilde{A}_{ji} \cdot \widetilde{X}_{ji} &= \left( a_j; \frac{\sigma_{a_j}}{3}; \frac{\sigma_{a_j}}{3} \right) \cdot (x_j; 0; 0) = \\ &= \left( a_j \cdot x_j; \frac{\sigma_{a_j}}{3} \cdot x_j + a_j \cdot 0; \frac{\sigma_{a_j}}{3} \cdot x_j + a_j \cdot 0 \right) = \\ &= \left( a_j \cdot x_j; \frac{\sigma_{a_j}}{3} \cdot x_j; \frac{\sigma_{a_j}}{3} \cdot x_j \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Як видно із викладок (3) фаззифікований *j*-й коефіцієнт регресійного рівняння масштабується на значення *j*-го аргументу, який визначається на основі РЕКН.

Натомість зовнішнє нечітке число у розробленому нами підході має передбачено асиметричним, що забезпечується наданням нечіткості не лише регресійним коефіцієнтам, але і матеріальним, організаційним і технологічним чинникам витрат труда.

Оскільки модель містить тільки 1 фактор – кількість номенклатурних позицій матеріалів (Кмат), з урахуванням вищезазначених обґрунтувань фаззифікації її можна представити у вигляді таких залежностей для внутрішнього ( $\widetilde{\{Троб\}_i}$ ) та зовнішнього ( $\widetilde{\{Троб\}_o}$ ) розтягнень:

Представлено фрагмент розрахунку трудомісткості робіт із поліпшеного фарбування всередині приміщень, а саме частину залежності без урахування вільної константи.

Оскільки ця модель містить тільки 1 фактор – кількість номенклатурних позицій матеріалів (Кмат), з урахуванням вищезазначених обґрунтувань фаззифікації її можна представити у вигляді таких залежностей для внутрішнього ( $\widetilde{Троб}_i$ ) та зовнішнього ( $\widetilde{Троб}_o$ ) розтягнень:

$$\begin{aligned} \widetilde{Троб}_i &= \left( -119,6; \frac{77,5}{3}; \frac{77,5}{3} \right) + \\ &+ \left( 45,25; \frac{13,9}{3}; \frac{13,9}{3} \right) \cdot (Кмат; 0; 0) \quad , \text{ або} \\ \widetilde{Троб}_i &= \left( -119,6; \frac{77,5}{3}; \frac{77,5}{3} \right) + \\ &+ \left( 45,25 \cdot Кмат; \frac{13,9}{3} \cdot Кмат; \frac{13,9}{3} \cdot Кмат \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{Троб}_o &= \left( -119,6; \frac{77,5}{3}; \frac{77,5}{3} \right) + \\ &+ \left( 45,25; \frac{13,9}{3}; \frac{13,9}{3} \right) \cdot (Кмат; 0,025 \cdot Кмат; 0,075 \cdot Кмат) \\ \widetilde{Троб}_o &= \left( -119,6; \frac{77,5}{3}; \frac{77,5}{3} \right) + \\ &+ \left( \begin{array}{c} 45,25 \cdot Кмат; \\ \left( \frac{13,9}{3} + 45,25 \cdot 0,025 \right) \\ \cdot Кмат; \left( \frac{13,9}{3} + 45,25 \cdot 0,075 \right) \\ \cdot Кмат \end{array} \right) \Rightarrow \\ \widetilde{Троб}_o &= (-119,6; 25,8; 25,8) + \\ &+ (45,25 \cdot Кмат; 5,8 \cdot Кмат; 8 \cdot Кмат) \end{aligned} \quad (5)$$

Відповідно у формулах (4), (5) представлено лише один добуток нечітких чисел.

Оскільки для формування зон трудомісткості застосовано лінійні залежності, подальше обґрунтування очікуваних витрат праці та інтерпретація їх впливу на показники якості й тривалість будівництва доцільно здійснювати шляхом підсумовування добутків нечітких чисел та вільного члена регресійної залежності. Такий підхід дозволяє перейти від окремих факторних впливів до інтегральної оцінки трудомісткості в умовах невизначеності, притаманної будівельним процесам.

Для простого та високоякісного фарбування внутрішніх поверхонь побудовано двофакторні моделі, графічна інтерпретація яких передбачає використання тривимірної системи координат, де  $\alpha$ -зріз представленої нечіткої моделі відповідає площині. З метою адаптації просторової графічної інтерпретації до площинного подання, придатного для скринінгу передумов досягнення очікуваного замовником рівня якості оздоблювальних робіт, по осі абсцис доцільно відкладати теоретичні значення трудомісткості. При цьому для кожного кроку зміни аргументу необхідно обчислювати два значення результативного показника: перше відповідає умовам одночасного зростання обох факторів впливу – кількості операцій або матеріалів (залежно від того, чи передбачене проектом просте або високоякісне фарбування) та їх маси; друге є усередненим результатом розрахунку тру-

домісткості за умови варіювання лише одного з факторів – або маси матеріалів, або кількості відповідно матеріалів чи операцій. Усереднення доцільно виконувати за формулою середньої арифметичної, виходячи з припущення, що зазначені фактори можуть змінюватися незалежно один від одного. Аналогічний підхід застосовується і до проміжних показників міри прийняття, що забезпечує коректність подальших узагальнень.

Практичне застосування запропонованого підходу полягає у використанні календарних графіків виконання робіт або фактичних виробничих даних щодо обсягів виконання. На їх основі визначають обсяг виконаних робіт, фактичні витрати праці, кількість видів і масу використаних будівельних матеріалів, а також уточнюють перелік основних і допоміжних операцій, що реально виконуються робітниками. Шляхом розрахунку відповідних співвідношень установлюють трудомісткість, кількість операцій, номенклатурних позицій будівельних матеріалів і їх масу в розрахунку на одиничний обсяг робіт. Із застосуванням аналітичних залежностей визначають міру прийняття теоретичної та фактичної трудомісткості робіт на конкретному об'єкті як такої, що є наближеною до усереднено-нормативних значень, прийнятих у системі управління якістю будівництва.

При цьому пропонуємо виділити 3 зони варіювання трудомісткості:

В межах абсцис внутрішнього розтягнення, які обмежені альфа-зрізом 0,83 – зона прийнятної відповідальності робітників.

В межах абсцис зовнішнього розтягнення, які відповідають альфа-зрізу 0,83, проте не збігаються із межами внутрішнього розтягнення. Ця зона відповідає трудовитратам дещо більшим, або меншим за зону 1 і може бути охарактеризована як зона зниженої відповідальності робітників, оскільки їх самоконтроль може послаблюватись через утому від монотонної роботи чи бажання прискорити допоміжні дії на менш відповідальних чи видимих етапах роботи.

Решта значень трудомісткості одиничного обсягу робіт, менших за ліву та більших за праву межі попередньої зони, визначають діапазони високого ризику погіршення якості робіт через негативні наслідки перевантаження чи недо-завантаження людського фактору.

Якщо фактична і теоретична трудомісткість потрапляє в інтервал 1 зони, можна при-

пустити, що якість робіт буде максимально наближена до такої, що передбачена проектною документацією, а тому не вдаватись до додаткових контролюючих заходів. Якщо до цього усередненого інтервалу потрапляє тільки теоретичне значення, можна стверджувати про існування передумов до несурового дотримання технологій, тому варто додатково здійснити вибіркового контролю робіт. Кількість досліджуваних ділянок варто збільшити на 1/3 з урахуванням викладених вище міркувань. Нарешті, якщо фактична трудомісткість належить 3-й зоні, незалежно від того, до якого інтервалу, № 1 чи 2, потрапила розрахункова трудомісткість, імовірність неякісної роботи зростає, тому кількість контролюючих заходів доцільно збільшити на 2/3. Коли ж і фактична, і розрахункова трудомісткість належатиме до будь-якого з інтервалів зони 3, обсяги контролюючих заходів слід подвоїти.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** За результатами проведеного дослідження встановлено, що параметри якості малярних робіт мають виражену залежність від організаційно-технологічних факторів, насамперед трудомісткості, складу та маси використаних матеріалів, а також кількості основних і допоміжних операцій, передбачених проектними рішеннями. Статистичний аналіз підтвердив наявність суттєвих і статистично значущих відмінностей між простим, поліпшеним і високоякісним фарбуванням, що свідчить про об'єктивну диференціацію рівнів якості будівельної продукції та обґрунтованість їх розгляду як окремих класів у системі управління якістю.

Результати двохвибіркового t-тесту показали, що підвищення проектних вимог до якості супроводжується системним зростанням трудових витрат, середнього розряду робіт і матеріаломісткості. При цьому найбільш чутливими до зміни рівня якості є показники трудомісткості та кваліфікаційних вимог до виконавців, тоді як номенклатура матеріалів у низці випадків зберігає відносну стабільність. Це дозволяє розглядати трудомісткість як інтегральний індикатор якості малярних робіт, доцільний для використання в аналітичних і прогнозних моделях.

Побудована регресійна модель засвідчила наявність статистично значущого прямого впливу матеріальної складової на трудомісткість робіт, що підтверджує доцільність включення відповідних факторів до цифровізова-

ного інструментарію управління якістю. Хоча пояснювальна здатність моделі є помірною, її результати відображають загальну тенденцію взаємозв'язку між ресурсними характеристиками та трудовими витратами й підтверджують необхідність урахування багатofакторної природи будівельних процесів.

Запропонований підхід до моделювання трудомісткості із застосуванням апарату нечітких множин дозволяє формалізувати вплив невизначених, частково якісних і варіативних факторів, характерних для оздоблювальних робіт. Адаптація двофакторних просторових моделей до площинного подання забезпечує можливість їх практичного вико-

ристання для скринінгу умов досягнення заданого рівня якості та підтримки управлінських рішень на етапах планування й контролю виконання робіт.

У цілому результати дослідження підтверджують доцільність поєднання статистичних методів аналізу з цифровими та інтелектуальними моделями на основі теорії нечітких множин у системах управління якістю будівництва. Це створює науково-методичне підґрунтя для підвищення обґрунтованості оцінки якості малярних робіт і розвитку адаптивних, орієнтованих на умови невизначеності, інструментів управління будівельним виробництвом.

### Список літератури

1. Shaban M., Al-Hassan B., Mohamad A. S. Digital transformation of quality management in the construction industry during the execution phase by integration of building information modeling (BIM) and cloud computing. *Building Engineering*, 2024, vol. 2, no. 1, p. 1132. <https://doi.org/10.59400/be.v2i1.1132>
2. Ghansah F. A., Edwards D. J. Digital technologies for quality assurance in the construction industry: current trend and future research directions towards Industry 4.0. *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 3, 844. <https://doi.org/10.3390/buildings14030844>
3. Han L., Bian X., Gu S., Liu C., Pan W., Zhao X. Research on construction quality management based on BIM. *International Journal of Frontiers in Engineering Technology*, 2022, vol. 4, no. 2, pp. 56–62. <https://doi.org/10.25236/IJFET.2022.040209>
4. Salvi S. S., Kerkar S. S. Quality assurance and quality control for project effectiveness in construction and management. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2020, vol. 9, no. 2. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS020028>
5. Tugai O.A. Organizational and technological, economic quality control aspects in the construction industry: collective monograph. Lviv-Toruń: Liha-Pres, 2019. 136 p.
6. Yoon S., Son S., Kim S. Design, construction, and curing integrated management of defects in finishing works of apartment buildings. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 10, 5382. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13105382>
7. Лівінський О.М., Ключев В.В., Савенко В.І. та ін. Менеджмент якості в будівництві та виробничі організаційні системи: монографія. Київ: Центр учбової літератури, 2018. 230 с.
8. Abdel-Hamid M., Abdelhaleem H. M. Improving the construction industry quality using the seven basic quality control tools. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2019, vol. 7, pp. 412–420. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2019.76028>
9. Wang J., Sun H. Research on quality control and safety management strategies in construction engineering construction. *Engineering Technology Trends*, 2024, vol. 2, no. 1. <https://doi.org/10.37155/2972-483X-0201-5>
10. Зельцер Р. Я. Інноваційні моделі і методи організації, управління і економічної оцінки технологічних процесів будівельного виробництва: монографія. Київ: «МП Леся», 2018. 208 с.
11. Organizational and technological model engineering in the construction industry: collective monograph / P. Ye. Hryhorovskiy et. al. Lviv – Toruń : Liha-Pres, 2019. 128 p.
12. Technical and economic aspects of real estate properties: collective monograph / Nikolaiev V.P. et. al. Lviv-Toruń: Liha-Pres, 2019. 124 p.

### References

1. Shaban M., Al Hassan B., Mohamad A. S. Digital transformation of quality management in the construction industry during the execution phase by integration of building information modeling (BIM) and cloud computing. *Building Engineering*, 2024, vol. 2, no. 1, p. 1132. <https://doi.org/10.59400/be.v2i1.1132>
2. Ghansah F. A., Edwards D. J. Digital technologies for quality assurance in the construction industry: current trend and future research directions towards Industry 4.0. *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 3, 844. <https://doi.org/10.3390/buildings14030844>
3. Han L., Bian X., Gu S., Liu C., Pan W., Zhao X. Research on construction quality management based on BIM. *International Journal of Frontiers in Engineering Technology*, 2022, vol. 4, no. 2, pp. 56–62. <https://doi.org/10.25236/IJFET.2022.040209>
4. Salvi S. S., Kerkar S. S. Quality assurance and quality control for project effectiveness in construction and management. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2020, vol. 9, no. 2. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS020028>
5. Tugai O.A. Organizational and technological, economic quality control aspects in the construction industry: collective monograph. Lviv-Toruń: Liha-Pres, 2019. 136 p.
6. Yoon S., Son S., Kim S. Design, construction, and curing integrated management of defects in finishing works of apartment buildings. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 10, 5382. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13105382>
7. Livinskyi O.M., Kliuiev V.V., Savenko V.I. ta in. Menedzhment yakosti v budivnytstvi ta vyrobnychi orhanizatsiini systemy: monohrafiia. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury, 2018. 230 s.

8. Abdel Hamid M., Abdelhaleem H. M. Improving the construction industry quality using the seven basic quality control tools. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2019, vol. 7, pp. 412–420. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2019.76028>
9. Wang J., Sun H. Research on quality control and safety management strategies in construction engineering construction. *Engineering Technology Trends*, 2024, vol. 2, no. 1. <https://doi.org/10.37155/2972-483X-0201-5>
10. Zeltser R. Ya. Innovatsiini modeli i metody orhanizatsii, upravlinnia i ekonomichnoi otsinky tekhnolohichnykh protsesiv budivelnogo vyrobnytstva: monohrafiia. Kyiv: «MP Lesia», 2018. 208 s.
11. Organizational and technological model engineering in the construction industry: collective monograph / P. Ye. Hryhorovskiy et. al. Lviv – Toruń : Liha-Pres, 2019. 128 p.
12. Technical and economic aspects of real estate properties: collective monograph / Nikolaiev V.P. et. al. Lviv-Toruń: Liha-Pres, 2019. 124 p.

## DIGITALIZED CONSTRUCTION QUALITY MANAGEMENT TOOLKIT BASED ON FUZZY SET THEORY

**Abstract.** *The article is devoted to the development and justification of a digital construction quality management tool based on fuzzy set theory using the example of painting works with different design quality requirements. The relevance of the study is due to the increasing complexity of construction processes, the increasing requirements of customers for the quality of finishing works and the need to make management decisions in conditions of uncertainty, variability of technologies and subjectivity of expert assessments. Traditional deterministic approaches to quality assessment do not fully take into account the fuzzy nature of labor intensity indicators, resource provision and organizational and technological factors.*

*The paper carried out a statistical analysis of the descriptive characteristics of the main factors of painting quality, the elemental estimate norms of which take into account the design requirements for surface design. Based on the results of two-sample tests of equality of means, the presence of statistically significant differences between simple, improved and high-quality painting in terms of labor intensity, average category of work and material intensity was proven. It was established that labor intensity is an integral indicator sensitive to changes in the quality level and appropriate for use as a target variable in analytical models.*

*Regression dependencies were constructed that quantitatively describe the impact of the material component on labor costs, and an approach to forming zones of expected labor intensity using fuzzy numbers and  $\alpha$ -sections was proposed. Two-factor models were developed for simple and high-quality painting, the spatial interpretation of which was adapted to a planar representation for the purpose of practical application in quality management systems. An algorithm for using models based on calendar schedules and actual production data to assess the degree of acceptance of actual labor intensity relative to averaged normative values was proposed.*

*The obtained results confirm the feasibility of combining statistical analysis methods with the apparatus of fuzzy set theory in digital construction quality management systems and create a methodological basis for the implementation of adaptive, uncertainty-oriented tools for supporting management decisions.*

**Keywords:** *construction quality management, labor intensity, material intensity, correlation-regression analysis, fuzzy set methods, organizational and methodological tools, quality, conformity assessment, BIM technologies, digitalization, economic and mathematical methods, digital transformation, construction, construction economics, construction organization.*

**Filippov O.V.**

Graduate student of the Department of Organization and Construction Management  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**Rasputnyi D.S.**

Graduate student of the Department of Construction Economics  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv