

УДК 519.237.5: 621.9

Б.О.Карпенко<sup>1</sup>, С.М.Лапач<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

### Моделювання точності друку 3D принтера

**Проблема:** розсіяння поля допуску розмірів деталей виготовлених за допомогою 3D – друку, що не дозволяє отримати номінальні значення.

**Мета дослідження.** Метою роботи є дослідження факторів що впливають на розмірну точність 3D – друку та визначення розмірності даної похибки, що дозволить виконувати необхідну корекцію розмірів деталі для певної марки пластику.

Результати наукового дослідження можуть бути використані у процесі покращення якості друківаних моделей за рахунок корекції розмірів трьох-мірної моделі деталі, тим самим скорочення часу на підготовку. Оскільки методика розроблена в ході роботи буде відрізнятися лише матеріалом, а саме його характеристиками, то вона може буде використана для корекції розмірів друку як металом так і порошковими матеріалами.

На розмірну точність друківаних деталей впливає багато факторів, зокрема висота шару ( $h$ , мм), швидкість друку ( $V$ , мм/с), кількість ліній стінки ( $n$ ), усадка тощо [1, 2, 3, 4]. В ході даної роботи було розглянуто вплив лише трьох факторів ( $h$ ,  $V$ ,  $n$ ); термічне розширення та наступна усадка матеріалу не розглядається, оскільки за її впливу складно адекватно оцінити вплив решти факторів. Тому для виключення усадки зі списку факторів, що впливають на процес друку слід розглянути суть усадки (рис.1).

На графіку наочно показано зростання адгезії з ростом температури ( $t$ ) і графік термічного розширення / наступної усадки ( $M_s$  - molding shrinkage).

Повертаючись до розширення полімерів, слід звернути увагу на те, що, чим більшому термічному розширенню був підданий пластик, тим більшою буде його подальша усадка після охолодження. Як висновок, можна сказати, що друкуючи зі сталою температурою, можна мінімізувати вплив усадки на подальші результати.

В результаті маємо вплив трьох факторів на точність виготовлення деталей, котрі показані на Рис. 2.

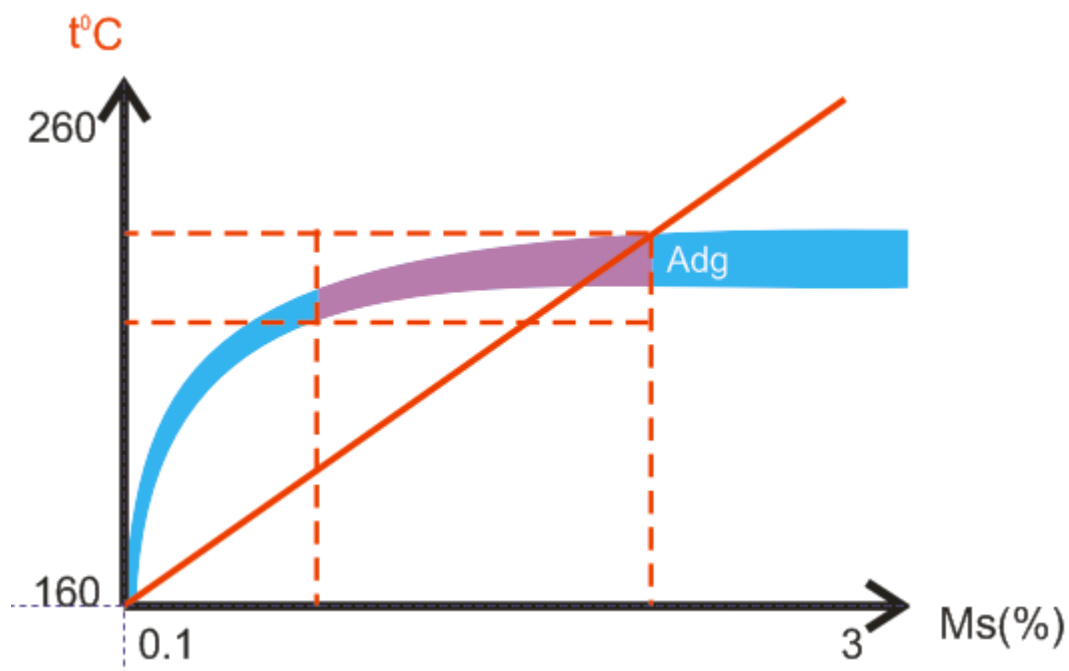


Рис.1. Залежність усадки від температури друку

425

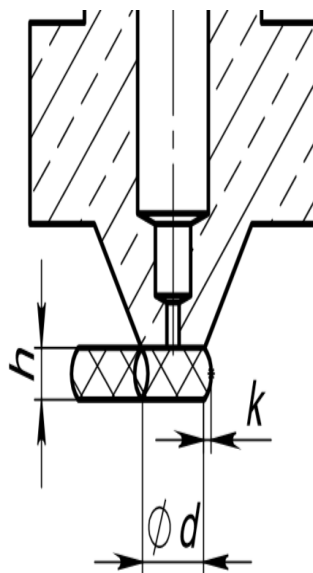


Рис. 2. Ескіз друкованого слою

Для побудови залежностей похибки використано регресійний аналіз [5, 8].  
Опис факторів, вибраних як незалежні змінні приведено в табл.1.

Для проведення досліджень вибрано робастний план на основі рівномірно розподілених в багатовимірному просторі псевдовипадкових ЛП<sub>т</sub> чисел. Такий вибір ґрунтується на двох (із багатьох) перевагах цього виду планів: можливість їх побудови без втрати попередніх досліджень і їх властивість бути одночасно планами для пошуку оптимальних умов [7, 8]. Робоча матриця і результати експериментів приведені в табл. 2.

Таблиця 1. Опис факторів

Номер фактору	Позначення і найменування	Рівні варіювання
1	висота шару $h$ , мм	0,1
		0,25
		0,05
2	швидкість друку $V_{пт}$ , мм/хв	30
		60
		10
3	кількість ліній стінки $n_{сл}$ , шт.	2
		4
		6

Таблиця 2. Робоча матриця і результати експериментів

№ експ.	Робоча матриця			Результати експериментів		
	$h$	$n$	$V$	$\Delta k_x$	$\Delta k_y$	$\Delta k_z$
1	0,2	6	30	0,01	-0,04	-0,08
2	0,2	2	60	0,02	0,01	0,07
3	0,15	4	40	0,02	-0,01	0,08
4	0,15	4	30	0,02	-0,02	0,06
5	0,15	4	40	-0,05	-0,11	0,16
6	0,1	2	50	0,01	-0,07	0,13
7	0,1	6	50	-0,01	-0,09	0,14
8	0,1	6	60	0,01	-0,07	0,13

Побудова моделей виконувалась в режимі автоматичного вибору структури за допомогою програмного засобу ПРИАМ (планування, регресія і аналіз моделей) [6]. Для забезпечення обчислювальної стійкості виконана ортогоналізація і нормування вихідної матриці (7 головних ефектів), а також побудовані подвійні і потрійні взаємодії (всього 28).

В результаті побудовані наступні моделі:

$$Y_{\Delta kx} = 0,0173102 + 0,0461442x_1 + 0,0360033x_2 - 0,0129006x_3 - 0,0100195z_1x_3 + 0,0111828x_1u_3;$$

$$Y_{\Delta ky} = -0,0383168 + 0,0252042x_1 - 0,0366284x_3 + 0,0166383u_3 - 0,0220537x_2u_3;$$

$$Y_{\Delta kz} = 0,0661717 - 0,112562x_1 - 0,0231297x_3 + 0,0119543x_2z_3,$$

$$\text{де: } x_1 = 17,7778*(X_1 - 0,14375); \quad z_1 = 2,05664*(x_1^2 - 0,153846*x_1 - 0,481482);$$

$$x_2 = 0,444444*(X_2 - 4,25); \quad x_3 = 0,0666667*(X_3 - 45); \quad u_3 = 3,75*(x_3^3 - 0,911111*x_3).$$

Статистичні характеристики моделей приводяться в табл. 2. Моделі адекватні, інформативні, структурно і обчислювально стійкі.

Таблиця 2. Статистичні характеристики моделей побудованих за всіма експериментами плану

Характеристика	Назва	$\Delta kx$	$\Delta ky$	$\Delta kz$
Інформативність	Множинний коефіцієнт кореляції (R)	0,999119	0,98356	0,998065
	Розрахункове значення критерію Фішера для перевірки значимості R ( $F_R$ )	226,64	22,25	343,56
	Критичне значення критерію Фішера для перевірки значимості R ( $F_{кр}$ )	19,30	9,12	6,59

	Степені свободи ( $v_1, v_2$ )	5, 2	4, 3	3, 4
	Частка розсіяння, яка пояснюється моделлю ( $R^2$ )	0,998238	0,96739	0,996134
	Критерій Бокса- Веца ( $\gamma$ )	3	1	6
	Гіпотеза про значимість множинного коефіцієнта кореляції	приймається	приймається	приймається
	Рівень інформативності	добрий	низький	Дуже високий
Адекватність	Дисперсія залишкова ( $S^2_{ад}$ )	$7,826 \cdot 10^{-6}$	0,000182468	$4,223 \cdot 10^{-5}$
	Дисперсія відтворюваності ( $S^2_{відт}$ )	$1,056 \cdot 10^{-7}$	$5,625 \cdot 10^{-7}$	$1,823 \cdot 10^{-6}$
	Розрахункове значення критерію Фішера для перевірки адекватності ( $F_{ад}$ )	255,34	13,27	160,12
	Критичне значення критерію Фішера для перевірки адекватності ( $F_{кр}$ )	19,30	9,12	3,40
	Степені свободи ( $v_1, v_2$ )	5, 2	4, 3	3, 4

	Гіпотеза про адекватність	приймається	приймається	приймається
Точність	Середня точність опису даних в процентах відхилення (%)	7,42	38,05	7,39
	Середня абсолютна похибка апроксимації ( $\Delta$ )	0,00127441	0,00631272	0,00386316
Стійкість	COND (число обумовленості)	2,20612	1,30743	1
	висновок	висока	висока	ідеальна
	Частка пояснення сумнівними регресорами (%)	0	0	0
	висновок	ідеальна	ідеальна	ідеальна
Рівень значущості	$\alpha$	0,05		

Моделі мають високі статистичні характеристики. Домінуючими є лінійні залежності, що видно, наприклад, з відповідних характеристик для однієї з моделей (див. рис. 3).

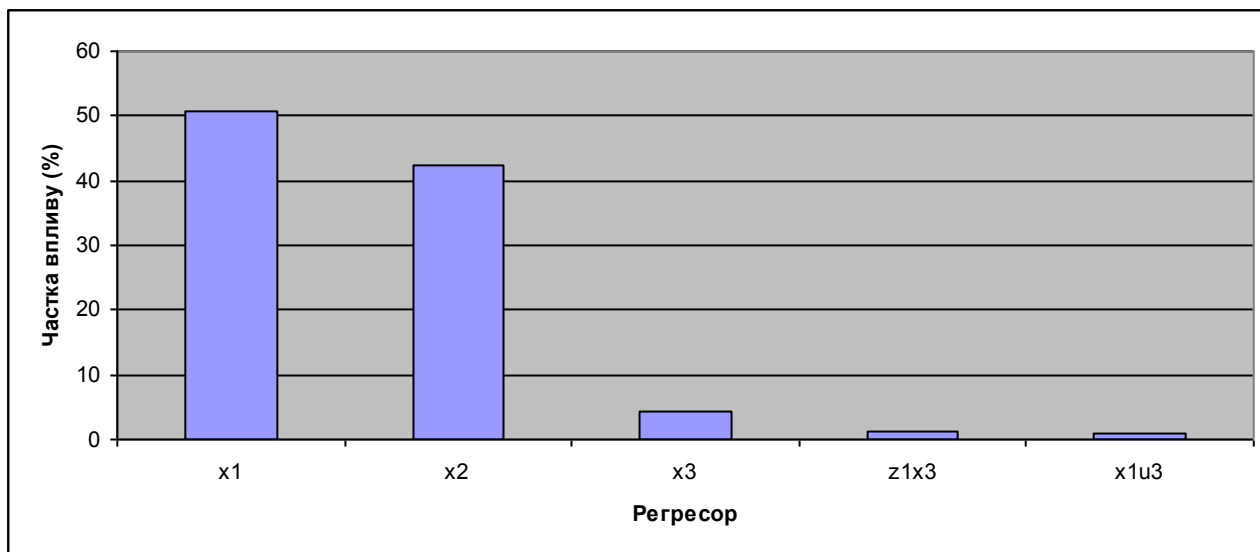


Рис. 3. Розподіл сили впливу регресорів на відгук для моделі  $\Delta kx$

Таку ж картину (незначна нелінійність) показують маргінальні поверхні відгуку для моделі  $\Delta kx$  (рис. 4, 5) і  $\Delta ky$  (рис. 6). Інші поверхні або являють собою площини, або ж аналогічні приведеним.

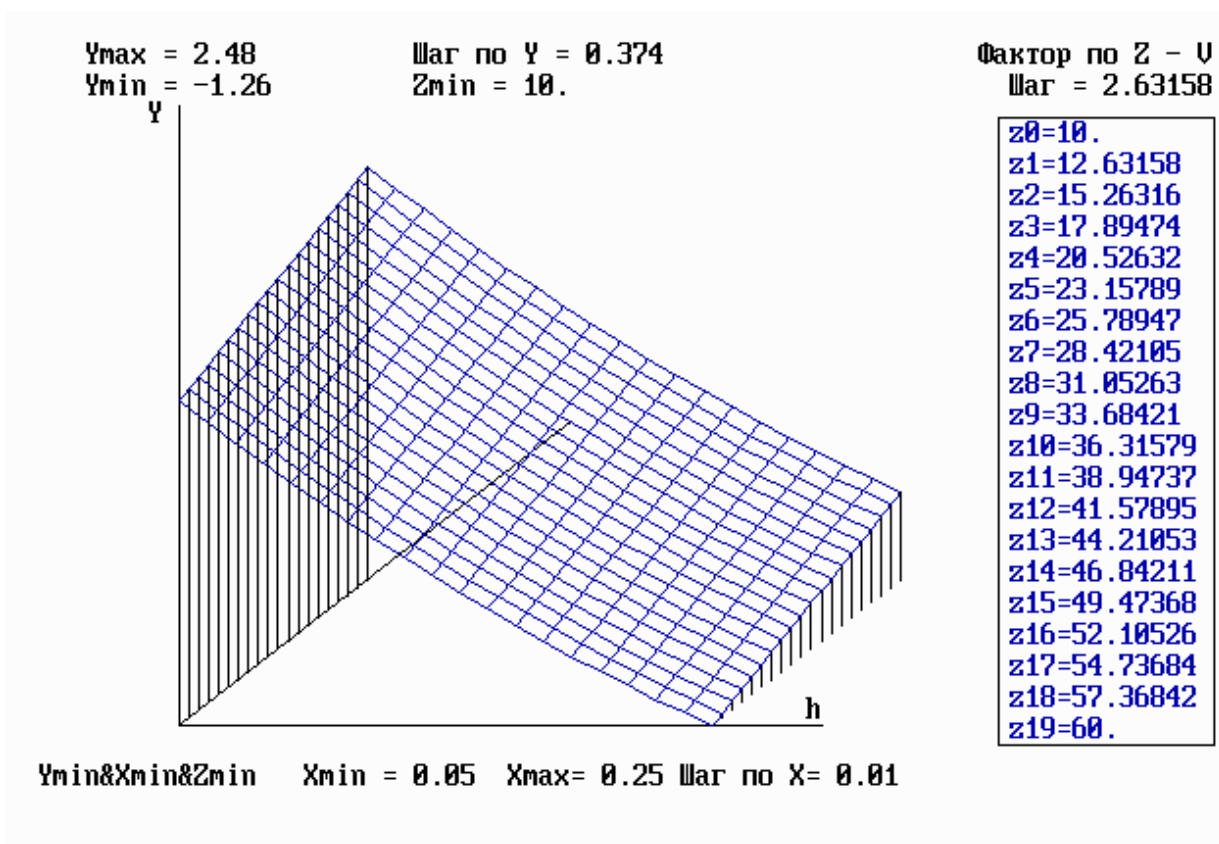
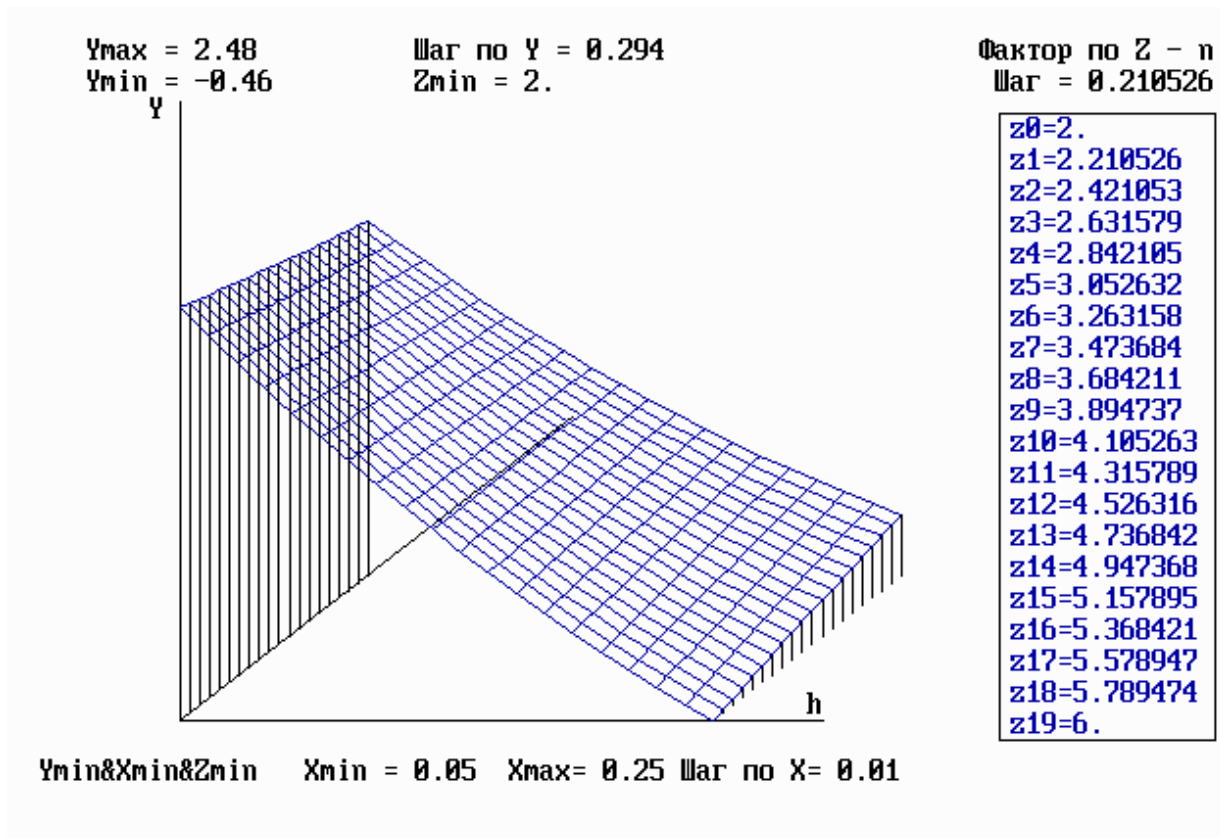


Рис.4. Маргінальна поверхня відгуку для  $\Delta kx$  (при  $n = 2$ )



Pe

Рис.5. Маргінальна поверхня відгуку для  $\Delta k_x$  (при  $V = 60$ )

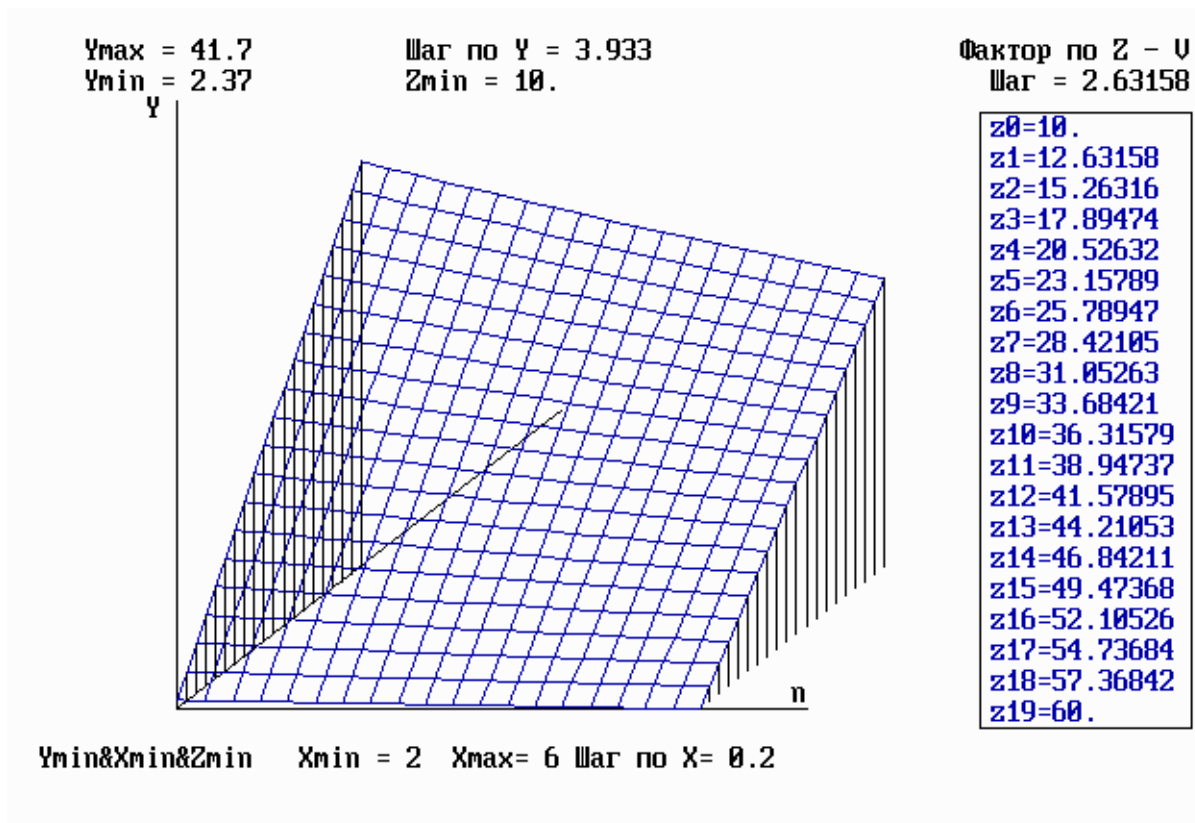


Рис. 6. Маргінальна поверхня відгуку для  $\Delta k_y$  (при  $h = 0,25$ )



Оскільки план має властивості, які забезпечують пошук оптимальних умов, то ми можемо провести багатокритеріальну оптимізацію за результатами експерименту методом введення метрики в простір цільових функцій [8, 9]. При оптимізації для отримання узагальненого критерію з відліком від ідеалу введена фіктивний експеримент, в якому всі зміщення дорівнюють нулю. Всі три показники вважаються рівнозначними. Результат оптимізації приведено в табл.3. Зауважимо, що результат оптимізації досить далекий (0,737486062) від ідеального і вимагає подальшої роботи.

Таблиця 3. Результати пошуку оптимального об'єкту

Критерії	$\Delta k_x$	$\Delta k_y$	$\Delta k_{xz}$
Цілі	min	min	min
Вагові коефіцієнти	0,333333333	0,333333	0,333333
Об'єкти	Ефективність		
5	0,737486062		
3	0,721474978		
4	0,688379336		
2	0,63921573		
7	0,401841885		
1	0,397227194		
8	0,306383643		
6	0,142365352		
Найкраща точка			
№ дослідю	Значення факторів		
	h	n	v
5	0,15	4	40

#### Висновки.

1. За проведеним експериментом побудовані регресійні моделі, які описують залежність відхилення від номіналу по трьом координатам від висоти шару (h, мм), швидкості друку (V, мм/с) і кількості ліній стінки (n). Моделі мають добрі

статистичні характеристики (інформативні, адекватні, структурно і обчислювально стійкі).

2. Виконано аналіз структури моделей, з якого випливає, що основний вклад в відхилення визначається лінійними складовими факторів, що спрощує керування відхиленнями.

3. Проведена багатокритеріальна оптимізація за експериментальними даними, яку дозволяє вибраний план експерименту, для пошуку значень факторів, які забезпечують мінімальне відхилення при даній області експерименту (факторного простору).

#### Список використаних джерел

1. Filamentarno. Тонкости 3D-печати. Часть 1. Полимеры. [Електронний ресурс] Filamentarno.–2509. –Режим допуску до джерела:

<https://3dtoday.ru/blogs/filamentarno/the-intricacies-of-3d-printing-part-1-polymers/>.

2. Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering [Електронний ресурс]. – 2014. – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4169505/>.

3. Effect of layer printing delay on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous prototypes in bone tissue engineering [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884215004010>.

4. А. Е. Зверовщиков, Д. С. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЕЙ 3D-ПЕЧАТИ / Д. А. Шелахаев С. А. Нестеров А. Е. Зверовщиков,. – 2019. – С. 13.

5. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит –Изд. 3-е. –М.: Диалектика, 2007. –912с.

6. Лапач С.Н., Радченко С.Г., Бабич П.Н. Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM ( ПРИАМ) / Каталог программные продукты Украины. К.: 1993. С. 24-27.

- 
7. С.Н. Лапач, А.В. Чубенко, П.Н. Бабич Статистические методы в медико-биологических исследованиях с использованием Excel –2 изд. перераб. и доп. – К.: 2001, Морион. – 408с.
  8. Лапач С.Н. Робастные планы эксперимента / Математичні машини і системи, 2016, № 4, С. 111-121.
  9. Оптимизация технологических условий сварки полиэтиленовых труб / С.Г. Радченко, Ю.С. Бурбело, Э.В. Котенко, С.Н. Лапач, Ю.А. Сидоренко, В.С. Лищинский // Пластические массы.–1988.– №9.–С.29–31.