

А. О. ПОЛІЩУК

аспірант кафедри машин і апаратів, електромеханічних
та енергетичних систем
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0001-7887-7169

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄМНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА

Залежність об'ємної продуктивності шнекового екструдера від розміру подрібнених часток у зоні завантаження можна визначити експериментальним шляхом. Метод експериментальних досліджень є найбільш точним для отримання реальних даних, оскільки враховує усі змінні властивості матеріалу та специфіку роботи екструзійного обладнання.

В даній роботі проведено експериментальне дослідження об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера. Визначено, що ключовими факторами для регулювання об'ємної продуктивності є: частота обертання шнека та температура нагрівання екструдера. Для створення точної моделі було враховано властивості матеріалу, а саме розмір часток полімеру, що будуть подаватися в завантажувальну зону екструдера. В якості досліджуваного матеріалу було вибрано ABS пластик. Здійснено експериментальні дослідження, засновані на методології планування експерименту за допомогою некомпозиційних планів другого порядку. Визначено основні рівні та діапазони змін факторів. Для розробки плану експерименту та створення регресійного рівняння була застосована програма «Optimization Model&Planning Experiment». Отримано матрицю плану, розраховано коефіцієнти рівняння регресії та дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії, перевірено значення дисперсії оптимізованого параметра. Описано поліноміальним рівнянням другого порядку в кодованому вигляді процес, що досліджується. Проведено розрахунок та порівняння коефіцієнтів рівняння регресії з довірчими інтервалами. Отримано рівняння регресії в розкодованому вигляді. Здійснено перевірку адекватності розробленого поліноміального рівняння другого порядку за допомогою F-критерію Фішера. Отримано рівняння регресії з натуральними величинами. Для наглядного представлення результатів трьохфакторного експерименту в аксонометрії були побудовані графічні залежності досліджуваних поверхонь відгуку. Неведені графіки залежності об'ємної продуктивності від досліджуваних параметрів. Проведений їх аналіз та зроблені відповідні висновки.

Ключові слова: планування експерименту, рівняння регресії, трьохфакторний експеримент, об'ємна продуктивність, шнековий екструдер, 3D-принтер.

А. О. POLISHCHUK

Postgraduate Student at the Department of Machines and Apparatus,
Electromechanical and Energy Systems
Khmelnytskyi National University
ORCID: 0000-0001-7887-7169

EXPERIMENTAL STUDY OF VOLUME PRODUCTIVITY OF SCREW EXTRUDER OF 3D PRINTER

The dependence of the volumetric productivity of the screw extruder on the size of the crushed particles in the loading zone can be determined experimentally. The method of experimental research is the most accurate for obtaining real data, as it takes into account all the variable properties of the material and the specifics of the operation of the extrusion equipment.

In this work, an experimental study of the volume performance of a screw extruder of a 3D printer was carried out. It was determined that the key factors for regulating the volumetric productivity are: screw rotation frequency and extruder heating temperature. To create an accurate model, the properties of the material, namely the size of the polymer particles that will be fed into the loading zone of the extruder, were taken into account. ABS plastic was chosen as the research material. Experimental studies based on the methodology of experiment planning using non-composite plans of the second order were carried out. The main levels and ranges of factor changes are determined. The "Optimization Model&Planning Experiment" program was used to develop an experiment plan and create a regression equation. The plan matrix was obtained, the coefficients of the regression equation and the variance of the coefficients of the regression equation were calculated, and the value of the variance of the optimized parameter was checked. The process under study is described by a second-order polynomial equation in coded form. The coefficients of the regression equation with confidence intervals were calculated and compared. The regression equation was obtained in a decoded form. The adequacy of the developed polynomial equation of the second order was tested using Fisher's F-criterion. A regression equation with natural values is obtained. For a visual presentation of the results of the three-factor experiment in axonometry, graphic dependences of the investigated response surfaces were constructed. The graphs of the dependence of volumetric productivity on the studied parameters are not shown. Their analysis was carried out and relevant conclusions were drawn.

Key words: experimental design, regression equation, three-factor experiment, volumetric productivity, screw extruder, 3D printer.

Постановка проблеми

На сьогодні відсутні залежності, які прямо пов'язують розмір подрібнених часток полімеру, які подаються в зону завантаження, з об'ємною продуктивністю шнекового екструдера. Це пов'язано зі складністю та багатofакторністю процесу екструзії. Аспекти, які впливають на це можуть бути наступними:

– тип полімерного матеріалу. Різні типи полімерів мають різні фізичні та хімічні властивості, що впливають на їх поведінку в процесі екструзії. Це ускладнює створення універсальної формули;

– розмір часток, який впливає на насипну густину матеріалу, швидкість його плавлення та здатність до проходження через екструдер. Великі частки можуть мати різну швидкість плавлення порівняно з дрібними, що також впливає на об'ємну продуктивність;

– технічні параметри шнекового екструдера. Конструкція шнека, його геометрія, швидкість обертання та температурний режим суттєво впливають на об'ємну продуктивність. Ці параметри можуть змінюватися в залежності від специфікацій обладнання та вимог до технологічного процесу;

– комплексність процесу екструзії. Екструзія є динамічним процесом, де одночасно відбувається подача, плавлення та дозування матеріалу. Взаємозв'язок між розміром часток і продуктивністю екструдера не є лінійним і вимагає комплексного аналізу;

– необхідність експериментальних даних. Для встановлення точного зв'язку між розміром часток та продуктивністю шнекового екструдера потрібно проводити детальні експериментальні дослідження з конкретними типами матеріалів та під конкретні умови експлуатації.

Доповнюючи останній аспект, важливо зазначити, що залежність об'ємної продуктивності шнекового екструдера від розміру подрібнених часток у зоні завантаження можна визначити шляхом експериментальних досліджень. Цей метод передбачає наступні кроки: підбір зразків полімерного матеріалу з різними розмірами часток для експериментального аналізу; проведення серії тестів на екструдері, де кожна партія матеріалу з різним розміром часток проходить через процес екструзії; вимірювання об'ємної продуктивності для кожної партії матеріалу; порівняння об'ємних продуктивностей для різних розмірів часток з метою встановлення, як зміна розміру часток впливає на продуктивність екструдера; створення графічного представлення даних, яке може допомогти виявити тенденції у залежності об'ємної продуктивності від розміру часток.

Метод експериментальних досліджень є найбільш точним для отримання реальних даних, оскільки враховує усі змінні властивості матеріалу та специфіку роботи екструзійного обладнання. Однак він вимагає значних ресурсів, часу та експертизи для проведення експериментів та аналізу даних.

Відсутність універсальної формули, яка б прямо пов'язувала ці параметри, вимагає індивідуального підходу при проектуванні та налаштуванні екструдерів, з урахуванням специфіки кожного окремого виробничого процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Полімерний матеріал, який подається в бункер екструдера для переробки, може бути у вигляді подрібнених часток, гранул або стрічки. Останній вид сировини часто використовується для переробки промислових відходів плівкових матеріалів. Такий вид полімерного матеріалу потребує використання спеціальних екструдерів з інтегрованими живильниками-дозаторами у бункерах для забезпечення рівномірної подачі матеріалу [1]. Це є важливим для забезпечення високої якості кінцевого продукту.

Також можуть застосовуватися нарізані стрічки з PET тари в якості сировини для живлення шнекового екструдера 3D-принтера [2]. Це потребує розробки певної конструкції шнека, який би міг захопити матеріал та перемістити його з зони завантаження у зону плавлення екструдера.

Гранульовані пластинки є найпоширенішим видом сировини для екструзії. Переробка полімерів у формі гранул є більш ефективною, оскільки гранули менш схильні до створення затворів у бункері, порівняно з порошком, а також вони легше піддаються пластифікації та гомогенізації в процесі екструзії.

На сьогодні є актуальним також переробка у шнековому екструдері 3D-принтера полімерного матеріалу у вигляді гранул, або подрібнених часток, які утворилися в процесі подрібнення відходів 3D-друку, швейної та взуттєвої промисловості тощо [3–6].

Формулювання мети дослідження

Метою експериментального дослідження об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера, з використанням методології планування експерименту, є систематичне дослідження та аналіз впливу ключових оперативних факторів на продуктивність екструзійного процесу. Це включає визначення оптимальних умов роботи екструдера для досягнення максимальної ефективності та якості друку, а також розробку математичної моделі або рівняння регресії, яке точно описує залежності між вхідними факторами та об'ємною продуктивністю. Завданням також є ідентифікація критичних факторів, які найбільше впливають на продуктивність, та встановлення меж їх варіювання для забезпечення оптимальних результатів друку.

Викладення основного матеріалу дослідження

Завдання планування експерименту включає в себе визначення оптимальної кількості та параметрів дослідів, необхідних для досягнення потрібної точності та результативності при пошуку оптимальних рішень [7]. В процесі

планування також враховується використання математичних методів для обробки результатів експериментів та прийняття відповідних рішень. В результаті, планування експерименту сприяє значному зменшенню кількості необхідних дослідів при отриманні математичної моделі процесу [8–10].

Проведено планування експерименту із застосуванням некомпозиційних планів другого порядку (вибірка з плану типу 3^k), де число факторів $k = 3, p = 3, N = 15$, число повторних дослідів $n = 3$ [11].

Обрані фактори x_1, x_2, \dots, x_n представляють розмірні величини, які можуть мати різні порядки, що створює певні труднощі під час проведення розрахунків.

Для полегшення запису умов досліду та подальшої обробки його даних попередньо здійснювалася операція кодування. Метод кодування використовується для перетворення розмірних величин факторів, які можуть мати різні масштаби та одиниці вимірювання, в безрозмірні кодовані значення. Це спрощує аналіз та порівняння впливу різних факторів у багатофакторних експериментах. Кодування дозволяє стандартизувати фактори, що полегшує обробку та інтерпретацію даних, забезпечує зручність у виконанні математичних операцій та аналітичних розрахунків, а також допомагає в ідентифікації та оцінці взаємодії між різними факторами. За методикою, представленою в [12], визначалися натуральні та кодовані фактори, що пов'язані між собою певними співвідношеннями.

Шнековий екструдер 3D-принтера, що досліджується, є багатофакторною системою, яка характеризується вихідним параметром, як об'ємна продуктивність $Q_{ш.е.}$. Для зв'язку режиму роботи шнекового екструдера 3D-принтера з об'ємною продуктивністю, основною метою є досягнення балансу між швидкістю друку та якістю виробу. Тому ключовими факторами для регулювання об'ємної продуктивності є: частота обертання шнека $n_{ш.}$ та температура нагрівання екструдера $T_{нагр.}$.

Залежність об'ємної продуктивності від цих двох параметрів може бути представлена у вигляді математичного виразу або емпіричної моделі:

$$Q_{ш.е.} = f(n_{ш.}, T_{нагр.}) \tag{1}$$

Однак, для створення точної моделі потрібно враховувати ще властивості матеріалу, а саме розмір часток полімеру d_p , що будуть подаватися в завантажувальну зону екструдера. В даному дослідженні в якості вихідної сировини шнекового екструдера використовувався ABS пластик.

Головна мета полягає у відшуванні оптимальної комбінації визначної кількості факторів і діапазону їх зміни, що дозволяє досягти найкращого значення обраного показника, у даному випадку – об'ємної продуктивності.

Отже, об'ємна продуктивність $Q_{ш.е.}$ виступає як параметр оптимізації, а зазначені параметри як обмеження. Використовуючи три незалежні фактори, які варіюються на трьох рівнях кожен необхідно встановити залежність:

$$Q_{ш.е.} = f(n_{ш.}, T_{нагр.}, d_p) \tag{2}$$

Така модель дозволяє більш точно оцінити, як зміна частоти обертання шнека, температури нагрівання та розміри матеріалу, що переробляється впливають на об'ємну продуктивність $Q_{ш.е.}$.

Діапазони змін факторів (мінімальні та максимальні межі) були визначені з урахуванням попередніх розрахунків і даних, отриманих з експериментальних досліджень. Ці межі покривають обсяг значень факторів, які є релевантними для використання в шнекових екструдерах 3D-принтерів [6]: $d_p=1,5 \dots 2,5$ мм; $n_{ш.}=3,0 \dots 9,0$ об/хв; $T_{нагр.}=230 \dots 250$ °C.

Для знаходження оптимальної об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера $Q_{ш.е.}$ та визначення впливу на неї діаметра часток полімерного матеріалу d_p , частоти обертання шнека $n_{ш.}$ та температури нагрівання екструдера $T_{нагр.}$ були здійснені експериментальні дослідження, засновані на методології планування експерименту за допомогою некомпозиційних планів другого порядку, зокрема використовувались вибірки з планів типу 3^k [11].

Ціль експериментального вивчення характеристик робочого процесу шнекового екструдера 3D-принтера полягає у встановленні, як вхідні параметри впливають на об'ємну продуктивність (2), визначенні її оптимального рівня та розробці регресійного рівняння, яке адекватно відображає результати цих дослідів.

У ході експерименту були визначені основні рівні та діапазони змін факторів, величини яких представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Значення рівнів та інтервалів варіювання факторів

Найменування та позначення факторів	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	Нижній рівень -1	Основний рівень 0	Верхній рівень +1	
Діаметр часток полімеру d_p , мм (x_1)	1,5	2,0	2,5	0,5
Частота обертання шнека, $n_{ш.}$, об/хв (x_2)	3,0	6,0	9,0	3,0
Температура нагрівання екструдера $t_{нагр.}$, °C (x_3)	230	240	250	10

Для розробки плану експерименту та створення регресійного рівняння була застосована програма «Optimization Model&Planning Experiment», розроблена на кафедрі машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем, яка доступна для вільного використання (ліцензія на вільне користування) [12]. У програмі використовувався некомпозиційний план другого порядку, здійснена вибірка за планом типу 3k [8, 9, 13].

Використовуючи зазначену програму та вводячи в неї кількість факторів разом з їх мінімальними та максимальними рівнями, була встановлена необхідна кількість експериментів. Також за допомогою програми були сформовані матриці для планування експериментів та відповідних значень. На основі цих даних були розраховані коефіцієнти для рівняння регресії, дисперсії цих коефіцієнтів та дисперсія оптимізованого параметра, а також отримане відповідне рівняння регресії.

Згідно з некомпозиційним планом другого порядку для трьох факторів передбачено виконання 15 дослідів. В центральній точці плану, коли всі фактори знаходяться на нульовому рівні ($x_1 = x_2 = x_3 = 0$), передбачено проведення трьох дослідів (досліди 5, 10, 15). Матриця плану наведена в табл. 2.

Таблиця 2

Матриця некомпозиційного плану другого порядку для трьох факторів (вибірка з плану типу 3k)

Номер дослідів	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_{12}	x_{22}	x_{32}	y
1	+1	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	y_1
2	+1	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	y_2
3	+1	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	y_3
4	+1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	y_4
5	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_5
6	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	y_6
7	+1	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	y_7
8	+1	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	y_8
9	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	y_9
10	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{10}
11	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	y_{11}
12	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	y_{12}
13	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	y_{13}
14	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	y_{14}
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{15}

У табл. 3 наведено матрицю плану, що була отримана із застосуванням програми «Optimization Model&Planning Experiment» [12].

Таблиця 3

Матриця плану

X1	X2	X3	Y
1,0	1,0	0,0	188,66628
1,0	-1,0	0,0	67,77125
-1,0	1,0	0,0	155,1474
-1,0	-1,0	0,0	55,92717
0,0	0,0	0,0	112,098
1,0	0,0	1,0	124,3597
1,0	0,0	-1,0	116,93862
-1,0	0,0	1,0	98,480446
-1,0	0,0	-1,0	124,81123
0,0	0,0	0,0	106,991
0,0	1,0	1,0	178,038
0,0	1,0	-1,0	157,27867
0,0	-1,0	1,0	64,8567
0,0	-1,0	-1,0	43,2378
0,0	0,0	0,0	106,285

У табл. 4 наведено коефіцієнти рівняння регресії, розраховані з використанням програмного забезпечення «Optimization Model&Planning Experiment».

Таблиця 4

Коефіцієнти рівняння регресії, отримані за допомогою програми «Optimization Model&Planning Experiment»

Коефіцієнти рівняння регресії	Значення коефіцієнтів рівняння регресії
b_{13}	8,437967300415039
b_{12}	5,418699264526367
b_{11}	6,857366561889648
b_{33}	0,8321342468261719
b_{23}	-0,21489334106445312
b_3	2,9335641860961914
b_{22}	1,5626564025878906
b_2	55,9171781539917
b_1	7,921199798583984
b_0	108,45800018310547

В табл. 5 представлено отримані дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії. Дисперсія S_y^2 параметра оптимізації після зроблених розрахунків склала $S_y^2 = 10,061803426768165$.

Таблиця 5

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії	Значення дисперсій коефіцієнтів рівняння регресії
$S_{b_{11}}^2$	2,5154508566920413
$S_{b_{12}}^2$	1,2577254283460206
$S_{b_{13}}^2$	2,7250717614163777
$S_{b_0}^2$	3,3539344755893885

Щоб перевірити значення дисперсії S_y^2 оптимізованого параметра, яке було отримано за допомогою програми «Optimization Model&Planning Experiment», було здійснено його розрахунок за методикою, описаною в [11]. Для цього було складено додаткову таблицю (табл. 6). Було використано суму квадратів S_E для обчислення дисперсії S_y^2 оптимізованого параметра на основі результатів експериментів, проведених у центральній точці плану.

Дисперсію S_y^2 параметра оптимізації було визначено з числом степенів вільності:

$$f_2 = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2, \tag{3}$$

де n_0 – число паралельних дослідів в центрі плану, $n_0 = 3$.

Таблиця 6

Допоміжна таблиця для розрахунку S_y^2

№ дослідів в центрі плану	Експериментальні значення по трьох дослідів в центрі плану Y_e	Середньо-арифметичне експериментальне значення по трьох дослідів в центрі плану Y_e	Різниця експериментальних та середньоарифметичного значення по трьох дослідів в центрі плану $Y_e - \bar{Y}_e$	Різниця квадратів експериментальних та середньоарифметичного значення по трьох дослідів в центрі плану $(Y_e - \bar{Y}_e)^2$
5	112,098	108,458	3,640	13,2496
10	106,991		-1,467	2,1521
15	106,2855		-2,173	4,7219
$S_y^2 = \frac{S_E}{n_0 - 1} = \frac{26,65341}{3 - 1} = 10,0618$				$S_E = \sum (Y_e - \bar{Y}_e)^2 = 20,1236$

Значення дисперсії S_y^2 параметра оптимізації, знайдене за допомогою розрахунків, відповідає значенню, отриманому програмою «Optimization Model&Planning Experiment».

Процес, що досліджується, було описано поліноміальним рівнянням другого порядку в кодованому вигляді за допомогою програми «Optimization Model&Planning Experiment»:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2, \tag{4}$$

де $b_0, b_1, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – коефіцієнти рівняння регресії [8, 9, 13].

Для того, щоб визначити значущість кожного коефіцієнта в рівнянні регресії, порівнювалося абсолютне значення цих коефіцієнтів з їх відповідними довірчими інтервалами. Довірчі інтервали для коефіцієнтів розраховуються згідно з формулою:

$$\Delta b_i = \pm t_T \cdot S_{b_i}, \quad (5)$$

де t_T – значення t-критерію Стьюдента, яке вибирається з таблиць відповідно до заданого рівня значимості та кількості ступенів вільності f_2 , що використовуються для обчислення дисперсії S_y^2 параметра оптимізації (для $f_2 = 2$ та рівня значимості 5% $t_T = 4,3$); S_{b_i} – похибка визначення i -го коефіцієнта регресії.

Похибка визначення i -го коефіцієнта регресії знаходиться:

$$S_{b_i} = +\sqrt{S_{b_i}^2}, \quad (6)$$

де $S_{b_i}^2$ – дисперсія i -го коефіцієнта регресії [11].

Коефіцієнт в рівнянні регресії розглядається як значимий, коли його абсолютне значення перевищує величину його довірчого інтервалу. У випадку, коли абсолютне значення коефіцієнта є меншим за довірчий інтервал, цей коефіцієнт вважається статистично незначущим і може бути вилучений з рівняння регресії. Довірчі інтервали для коефіцієнтів рівняння регресії визначаються згідно з формулою (5):

$$\Delta b_{11} = \pm 6,81; \quad \Delta b_i = \pm 4,82; \quad \Delta b_{ii} = \pm 7,09; \quad \Delta b_0 = \pm 7,87.$$

Порівняння коефіцієнтів рівняння регресії з довірчими інтервалами показало, що коефіцієнти b_{33} , b_{12} , b_{22} , b_{23} , b_{33} менші за довірчий інтервал. Хоча дані коефіцієнти є статистично не значимими прийнято рішення не виключити їх з рівняння регресії. Це можна обґрунтувати тим, що на сьогодні не існує теоретичної залежності, яка описує вплив розміру подрібнених часток полімеру, частоти обертання шнеку та температури нагрівання матеріалу на об'ємну продуктивність шнекового екструдера. Тому слід побудувати повну модель, яка включає всі потенційно важливі змінні, незалежно від їх статистичної значущості. Прийнято допущення, що дані коефіцієнти вносять свій вплив на залежну величину.

Підставивши коефіцієнти рівняння регресії (табл. 4), в рівняння (4), було отримано:

$$y = 108,4580 + 7,9212 \cdot x_1 + 55,9172 \cdot x_2 + 2,9336 \cdot x_3 + 5,4187 \cdot x_1 \cdot x_2 + 8,4380 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,2149 \cdot x_2 \cdot x_3 + 6,8574 \cdot x_1^2 + 1,5627 \cdot x_2^2 + 0,8321 \cdot x_3^2 \quad (7)$$

Рівняння регресії в розкдованому вигляді має наступний вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{x_{11} - 2,0}{0,5} \right) + b_2 \cdot \left(\frac{x_{12} - 6,0}{3,0} \right) + b_3 \cdot \left(\frac{x_{13} - 240,0}{10,0} \right) + b_{12} \cdot \left(\frac{x_{11} - 2,0}{0,5} \right) \times \left(\frac{x_{12} - 6,0}{3,0} \right) + b_{13} \cdot \left(\frac{x_{11} - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left(\frac{x_{13} - 240,0}{10,0} \right) + b_{23} \cdot \left(\frac{x_{12} - 6,0}{3,0} \right) \cdot \left(\frac{x_{13} - 240,0}{10,0} \right) + b_{11} \cdot \left(\frac{x_{11} - 2,0}{0,5} \right)^2 + b_{22} \cdot \left(\frac{x_{12} - 6,0}{3,0} \right)^2 + b_{33} \cdot \left(\frac{x_{13} - 240,0}{10,0} \right)^2. \quad (8)$$

Підставивши коефіцієнти, отримаємо:

$$y = 108,4580 + 7,9212 \cdot \left(\frac{x_{11} - 2,0}{0,5} \right) + 55,9172 \cdot \left(\frac{x_{12} - 6,0}{3,0} \right) + 2,9336 \cdot \left(\frac{x_{13} - 240,0}{10,0} \right) + 5,4187 \cdot \left(\frac{x_{11} - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left(\frac{x_{12} - 6,0}{3,0} \right) + 8,4380 \cdot \left(\frac{x_{11} - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left(\frac{x_{13} - 240,0}{10,0} \right) - 0,2149 \times \left(\frac{x_{12} - 6,0}{3,0} \right) \cdot \left(\frac{x_{13} - 240,0}{10,0} \right) + 6,8574 \cdot \left(\frac{x_{11} - 2,0}{0,5} \right)^2 + 1,5627 \cdot \left(\frac{x_{12} - 6,0}{3,0} \right)^2 + 0,8321 \cdot \left(\frac{x_{13} - 240,0}{10,0} \right)^2. \quad (9)$$

Перевірку адекватності розробленого поліноміального рівняння другого порядку здійснюємо за допомогою F -критерію Фішера [14]. Для цього спершу обчислюємо дисперсію S_{ao}^2 адекватності, використовуючи наступну формулу:

$$S_{ao}^2 = \frac{S_R - S_E}{f_1}, \quad (10)$$

де S_R – це сума квадратів відхилень між обчисленими значеннями Y_p та експериментально отриманими Y_e функції відгуку у всіх точках плану; f_1 – кількість степенів свободи,

$$f_1 = N - k' - (n_0 - 1), \tag{12}$$

де N – загальна кількість експериментів у матриці планування; $N = 15$; k' – число коефіцієнтів рівняння регресії (3), $k' = 10$.

Обчислені значення Y_p функції відгуку, отримані з використанням рівняння регресії (8); середньоарифметичне експериментальне значення, отримане з трьох паралельних вимірювань Y_e ; розбіжності між експериментальними та обчисленими значеннями $Y_p - Y_e$, а також S_R наведені в таблиці 7.

Таблиця 7

Матриця значень

№ п/п	x1	x2	x3	Y_e	Y_p	$Y_e - Y_p$	$(Y_e - Y_p)^2$
1	2,5	9,0	240	188,66628	186,1351004	2,531179635	6,406870346
2	2,5	3,0	240	67,77125	63,46334553	4,307904472	18,55804094
3	1,5	9,0	240	155,1474	159,4553022	-4,307902238	18,5580217
4	1,5	3,0	240	55,92717	58,45834446	-2,53117446	6,406844145
5	2,0	6,0	240	112,098	108,4580002	3,639999817	13,24959867
6	2,5	6,0	250	124,3597	135,4402323	-11,08053228	122,7781955
7	2,5	6,0	230	116,93862	112,6971693	4,241450696	17,98990401
8	1,5	6,0	250	98,480446	102,7218981	-4,241452079	17,98991574
9	1,5	6,0	230	124,81123	113,7307043	11,08052569	122,7780496
10	2,0	6,0	240	106,991	108,4580002	-1,467000183	2,152089537
11	2,0	9,0	250	178,038	169,4886398	8,549360168	73,09155929
12	2,0	9,0	230	157,27867	164,0512981	-6,772628141	45,86849194
13	2,0	3,0	250	64,8567	58,08407021	6,772629794	45,86851433
14	2,0	3,0	230	43,2378	51,78715515	-8,549355151	73,0914735
15	2,0	6,0	240	106,285	108,4580002	-2,173000183	4,721929796
							$S_R = \sum (Y_e - Y_p)^2 = 589,510$

Дисперсію S_{ad}^2 адекватності було розраховано за формулою (10):

$$S_{ad}^2 = \frac{589,510 - 18,86}{15 - 10 - (3 - 1)} = 190,21.$$

Дисперсію адекватності S_{ad}^2 визначено з числом степенів свободи $f_1 = 3$.

Розрахункове значення F -критерію було розраховано за формулою [14]:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{190,21}{10,06} = 18,90. \tag{13}$$

При п'яти відсотковому рівні значимості та числах степенів свободи $f_1 = 3$ та $f_2 = 2$ табличне значення F -критерію дорівнює $F_T = 19,2$ [14]. Рівняння регресії визнається адекватним за умови що дотримується наступне правило: $F_p < F_T = 18,9 < 19,2$. Отже, рівняння регресії є адекватним.

Замінюючи натуральними величинами у рівнянні (9) кодовані значення факторів було отримано:

$$\begin{aligned} Q_{\text{шн.е.}} = & 108,4580 + 7,9212 \cdot \left(\frac{d_v - 2,0}{0,5} \right) + 55,9172 \cdot \left(\frac{n_{\text{шн.}} - 6,0}{3,0} \right) + 2,9336 \cdot \left(\frac{T_{\text{нагр.}} - 240,0}{10,0} \right) + \\ & + 5,4187 \cdot \left(\frac{d_v - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left(\frac{n_{\text{шн.}} - 6,0}{3,0} \right) + 8,4380 \cdot \left(\frac{d_v - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left(\frac{T_{\text{нагр.}} - 240,0}{10,0} \right) - 0,2149 \times \\ & \times \left(\frac{n_{\text{шн.}} - 6,0}{3,0} \right) \cdot \left(\frac{T_{\text{нагр.}} - 240,0}{10,0} \right) + 6,8574 \cdot \left(\frac{d_v - 2,0}{0,5} \right)^2 + 1,5627 \cdot \left(\frac{n_{\text{шн.}} - 6,0}{3,0} \right)^2 + \\ & + 0,8321 \cdot \left(\frac{T_{\text{нагр.}} - 240,0}{10,0} \right)^2. \end{aligned} \tag{14}$$

Коефіцієнти рівняння регресії (7) в кодованому вигляді показують величину впливу факторів ($d_v, n_{\text{шн.}}, T_{\text{нагр.}}$) на вихідний параметр $Q_{\text{шн.е.}}$ та є кількісною його мірою [11].

Для наглядного представлення результатів трьохфакторного експерименту в аксонометрії були побудовані графічні залежності досліджуваної поверхні відгуку. Для їх побудови використовувався Colab, відомий також як Google Colaboratory та є безкоштовною хмарною службою від Google, яка дозволяє писати та виконувати Python-код через браузер [15].

Ця діаграма демонструє взаємодію трьох факторів на об'ємну продуктивність $Q_{шт.е.}$. Один із факторів було залишено сталим, оскільки одночасне змінювання трьох факторів утворює просторову фігуру, яку важко візуалізувати [11]. Незмінним фактором було вибрано розмір часток полімеру, що завантажується в шнековий екструдер 3D-принтера. Було зафіксовано його на відповідних рівнях варіювання.

Графіки залежності функції відгуку об'ємної продуктивності $Q_{шт.е.} = f(n_{шт.}, T_{нагр.}, d_{ч.})$ при частоті обертання шнека $n_{шт.}$ та температурі нагрівання екструдера $T_{нагр.}$ на рівні від «-1» до «+1» при незмінному розмірі часток полімеру $d_{ч.}$ ($d_{ч.} = 1,5\text{ мм}$, $d_{ч.} = 2,0\text{ мм}$, $d_{ч.} = 2,5\text{ мм}$) представлено на рис. 1.

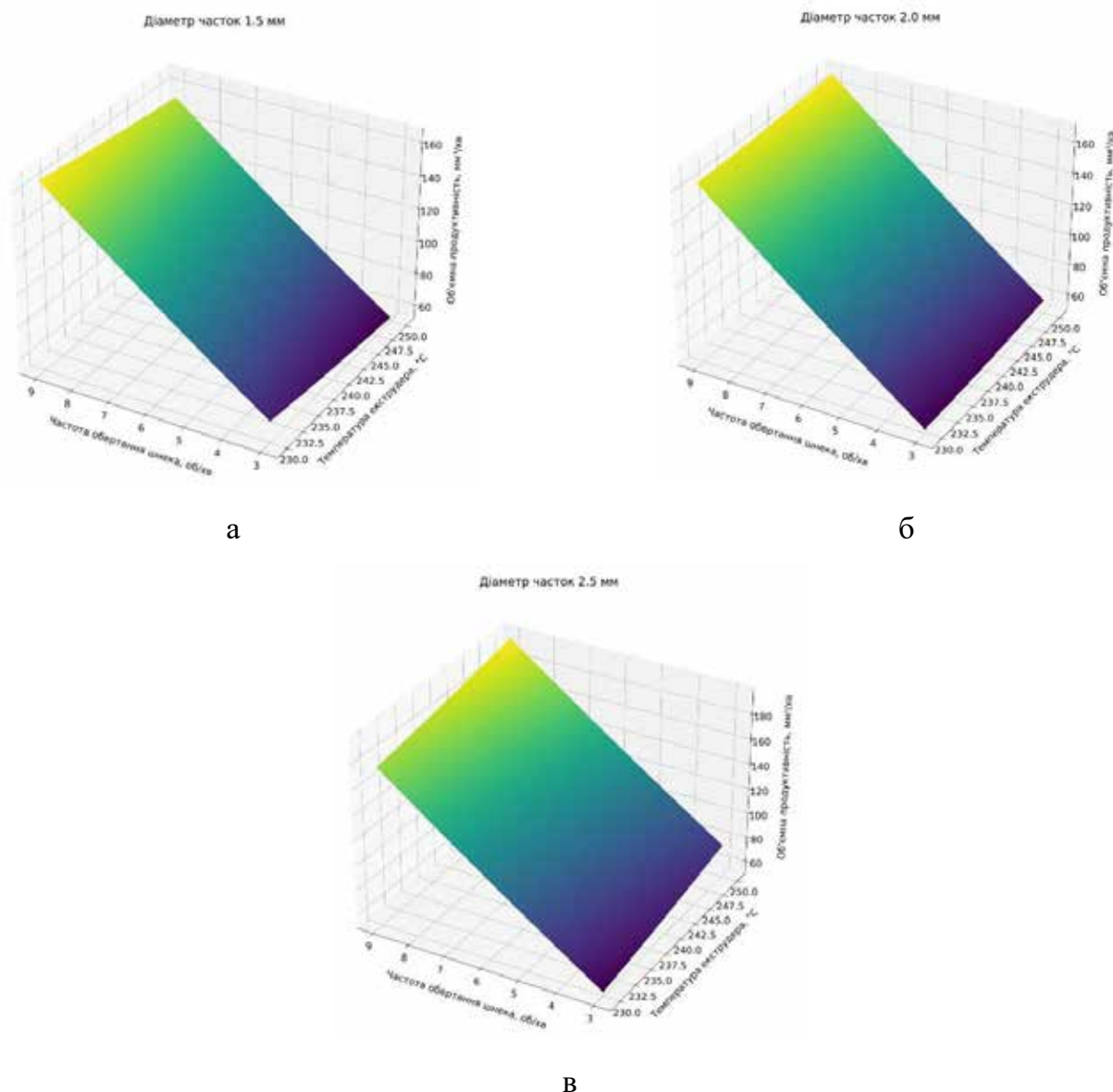


Рис. 1. Графіки залежності функції відгуку об'ємної продуктивності $Q_{шт.е.} = f(n_{шт.}, T_{нагр.}, d_{ч.})$ при частоті обертання шнека $n_{шт.}$ та температурі нагрівання $T_{нагр.}$ на рівні від «-1» до «+1» при незмінному розмірі часток полімеру $d_{ч.}$: а – 1,5 мм; б – 2,0 мм; в – 2,5 мм

Зробивши аналіз графіків залежності об'ємної продуктивності шнекового екструдера $Q_{шт.е.}$ від частоти обертання шнека $n_{шт.}$ та температури нагрівання екструдера $T_{нагр.}$ при різних розмірах часток полімеру (рис. 1), можна зробити наступні висновки взаємозв'язок між трьома графіками.

1. Збільшення діаметра часток полімеру d_c з 1,5 мм до 2,5 мм практично не впливає на загальну форму залежності об'ємної продуктивності від частоти обертання шнека та температури нагрівання екструдера. Однак, може змінюватись рівень об'ємної продуктивності, що вказує на те, що при більших діаметрах часток полімеру можливе досягнення більшої об'ємної продуктивності.

На всіх трьох графіках частота обертання шнека має позитивний вплив на об'ємну продуктивність. Однак, цей вплив не є лінійним, і існує оптимальний діапазон частоти обертання, за межами якого додаткове збільшення частоти не призводить до пропорційного зростання продуктивності.

Температура нагрівання екструдера також має позитивний вплив на об'ємну продуктивність, але, як і в попередньому випадку, існує оптимальний діапазон температур. Для більших діаметрів часток полімеру оптимальна температура може бути трохи вищою, оскільки потрібно більше тепла для плавлення крупніших часток.

Оптимальні параметри. Для $d_c = 1,5$ мм: оптимальна об'ємна продуктивність досягається при середніх значеннях частоти обертання шнека та температури нагрівання. Для $d_c = 2,0$ мм: оптимальна об'ємна продуктивність досягається при подібних або трохи вищих значеннях частоти та температури в порівнянні з $d_c = 1,5$ мм. Для $d_c = 2,5$ мм: оптимальна об'ємна продуктивність досягається при вищих значеннях частоти та температури, що вказує на потребу більшої енергії для екструдювання більших часток.

Графіки залежності об'ємної продуктивності $Q_{шт.е.}$ від частоти обертання $n_{шт.}$ при різних розмірах часток пластику ABS приведено на рис. 2.

Графіки залежності об'ємної продуктивності $Q_{шт.е.}$ від частоти обертання $n_{шт.}$ при різних температурах нагрівання екструдера $T_{нагр.}$ показано на рис. 3.

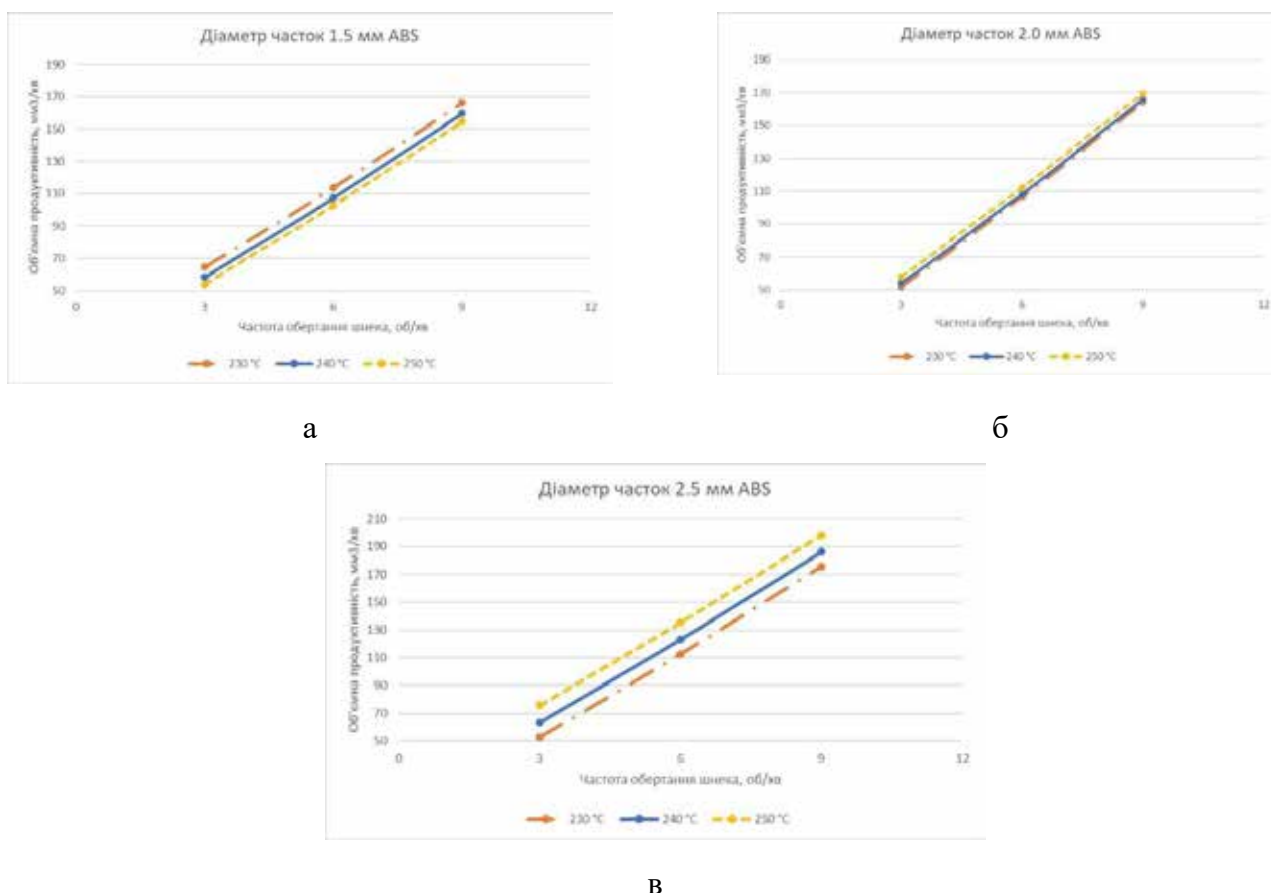


Рис. 2. Графіки залежності об'ємної продуктивності $Q_{шт.е.}$ від частоти обертання $n_{шт.}$ при різних розмірах часток пластику ABS: а – 1,5 мм; б – 2,0 мм; в – 2,5 мм

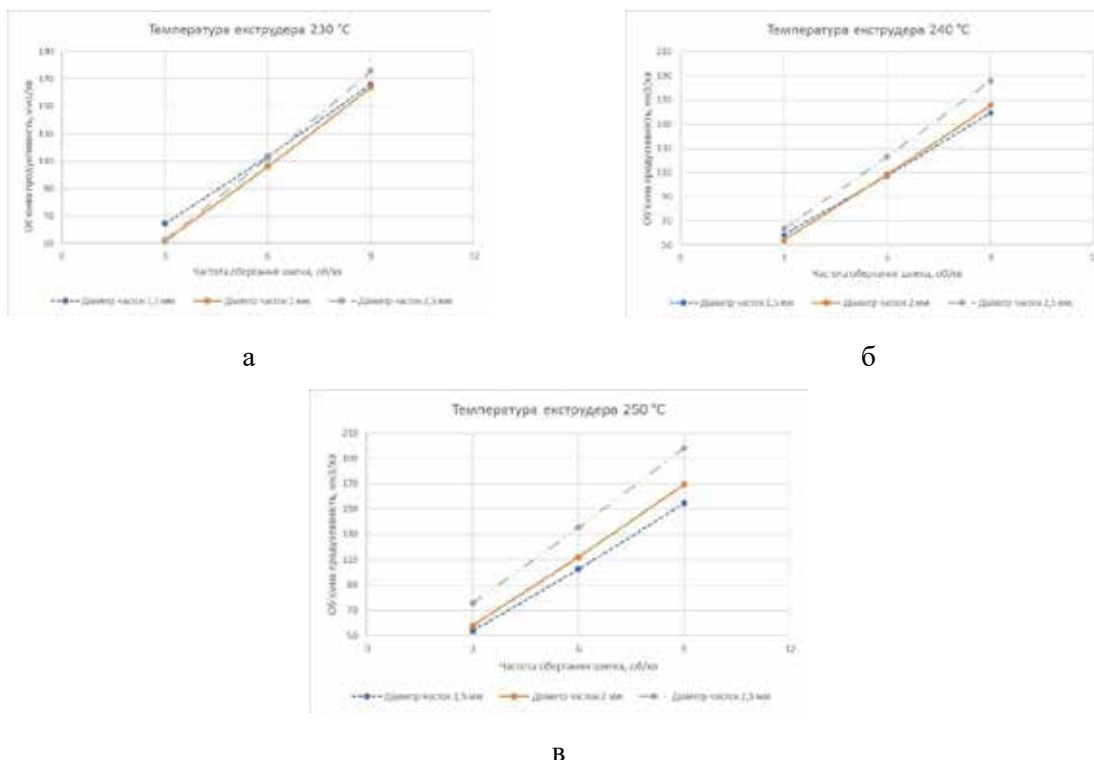


Рис. 3. Графіки залежності об’ємної продуктивності $Q_{шт.е.}$ від частоти обертання $n_{шт.}$ при різних температурах нагрівання екструдера $T_{нагр.}$: а – 230 °С; б – 240 °С; в – 250 °С

Аналіз графіків, приведених на рис. 1–3, дав змогу визначити значення об’ємної продуктивності при різних поєднаннях незалежних факторів. Дані значення наведені в табл. 8.

Таблиця 8

Значення об’ємної продуктивності при різних поєднаннях незалежних факторів

Значення	Об’ємна продуктивність $Q_{шт.е.}$, мм³/хв	Параметри		
		Діаметр часток полімеру $d_{ч.}$, мм	Частота обертання $n_{шт.}$, об/хв	Температура екструдера $T_{нагр.}$, °С
Максимальне значення	198,123	2,5	9	250
Мінімальне значення	51,787	2	3	230
Діапазон вимірювання	51,787–263,932	1,5–2,5	3–9	230–250
Оптимальне значення	198,123	2,5	9	250

Висновки

Експериментальне дослідження об’ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера показало, що частота обертання шнека, температура нагрівання екструдера та діаметр часток полімеру ABS суттєво впливають на продуктивність процесу екструзії.

Було виявлено, що збільшення частоти обертання шнека призводить до зростання об’ємної продуктивності, але досягнення деякого порогу може спричинити зниження якості друку через нерівномірність подачі матеріалу. Оптимальна температура нагрівання забезпечувала рівномірне плавлення полімеру ABS, що сприяло покращенню якості та однорідності екструдованого матеріалу. Відносно діаметру часток полімеру було встановлено, що більший діаметр полегшує процес екструзії, але може впливати на деталізацію та точність кінцевого продукту.

В цілому, використання планування експерименту дозволило визначити оптимальні параметри роботи шнекового екструдера для досягнення високої об’ємної продуктивності з урахуванням якості друку. Результати цього дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності роботи шнекових екструдерів 3D-принтерів, особливо при роботі з полімером ABS.

Список використаної літератури

1. Екструзія [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://vitcompany.com.ua/ekstruziya.html> (дата звернення: 15.12.23). Назва з екрану.

2. Polishchuk A.O. Equipment for processing pet bottles into raw materials for the screw extruder of the 3D printer / A.O. Polishchuk, M.Ye. Skyba, O.S. Polishchuk // *Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування»: Збірник матеріалів, 21 грудня, 2023 р.* – Полтава: ПДАУ, 2023.
3. Zozulia P. Development and investigation of device for processing polymer materials by 3D-printing method / P. Zozulia, O. Polishchuk, N. Kostyuk, A. Polishchuk // *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*. 2019. Vol. 5, No. 3–4. P. 25–31.
4. Polishchuk O. Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry / O. Polishchuk, P. Zozulia, A. Polishchuk, P. Maidan, M. Skyba, N. Kostyuk, A. Kravchuk and O. Kravchuk // *Fibres and Textiles*. 2020. № 4. P. 75–80.
5. Polishchuk A. Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production / A. Polishchuk, A. Slavinska, O. Polishchuk, V. Mytsa // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Volume 2889. Issue 17.
6. Поліщук А.О. Розробка конструкції шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули або подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини / А.О. Поліщук // *Технології та інжиніринг*. 2023. № 5. С. 33–49.
7. Йохна М.А. Розробка методики пошуку оптимальних параметрів нелінійних моделей для систем управління ефективністю діяльності підприємств / М.А. Йохна, Ю.Б. Михайловський, Е.О. Янковець // *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2011. № 2. Т. 1. С. 39–43.
8. Поворознюк А.І. Методологія та організація наукових досліджень: навч. посіб. / А.І. Поворознюк, В.І. Панченко, А.Є. Філатова. Харків: «НТМТ», 2016. 192 с.
9. Лапач С.М. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи [Електронний ресурс] / С.М. Лапач. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.
10. Назаренко Л.А. Конспект лекцій з курсу «Планування і обробка результатів експерименту» / Л.А. Назаренко. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 163 с.
11. Поліщук О.С. Наукові основи проектування електромеханічного пресового обладнання легкої промисловості: дис... д-ра техн. наук: 05.05.10 / Київський національний ун-т технологій та дизайну. К., 2019. 372 с.
12. Пошук глобального оптимуму для завдань оптимального проектування систем чи визначення оптимальних законів управління [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://surl.li/ohxok_\(дата_звернення:_15.12.23\)](http://surl.li/ohxok_(дата_звернення:_15.12.23)). Назва з екрану.
13. Поліщук О.С. Електромеханічне пресове обладнання на підприємствах легкої промисловості: монографія / О.С. Поліщук. Хмельницький: Видавництво PolyLux, 2018. 285 с.
14. Горонескуль М.М. Таблиці функцій та критичних точок розподілів. Розділи: Теорія ймовірностей. Математична статистика. Математичні методи в психології / М.М. Горонескуль. Харків: УЦЗУ, 2009. 90 с.
15. Colab [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://colab.research.google.com/> (дата звернення 12.12.23). Назва з екрану.

References

1. Extrusion [Electronic resource]. Access mode: <https://vitcompany.com.ua/ekstruziya.html> (date of application: 12/15/23). Name from the screen.
2. Polishchuk A.O. Equipment for processing pet bottles into raw materials for the screw extruder of the 3D printer / A.O. Polishchuk, M.Ye. Skyba, O.S. Polishchuk // *Materials of the VI All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference “Problems and Prospects of the Development of Agricultural Machinery”*: Collection of Materials, December 21, 2023. Poltava: PDAU, 2023.
3. Zozulia P. Development and investigation of device for processing polymer materials by 3D-printing method / P. Zozulia, O. Polishchuk, N. Kostyuk, A. Polishchuk // *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*. 2019. Vol. 5, No. 3–4. P. 25–31.
4. Polishchuk O. Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry / O. Polishchuk, P. Zozulia, A. Polishchuk, P. Maidan, M. Skyba, N. Kostyuk, A. Kravchuk and O. Kravchuk // *Fibres and Textiles*. 2020. No. 4. P. 75–80.
5. Polishchuk A. Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production / A. Polishchuk, A. Slavinska, O. Polishchuk, V. Mytsa // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Volume 2889. Issue 17.
6. Polishchuk A.O. Development of a screw extruder design for a 3D printer that uses granules or crushed polymer particles as raw materials / A.O. Polishchuk // *Technologies and engineering*. 2023. No. 5. P. 33–49.
7. Johna M.A. Development of a methodology for finding optimal parameters of nonlinear models for enterprise efficiency management systems / M.A. Johna, Yu.B. Mykhaylovskiy, E.O. Yankovets // *Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Economic sciences*. 2011. No. 2. Т. 1. P. 39–43.

8. Povoroznyuk A.I. Methodology and organization of scientific research: teaching. manual / A.I. Povoroznyuk, V.I. Panchenko, A.E. Filatova. Kharkiv: "NTMT", 2016. 192 p.
9. Lapach S.M. Theory of experiment planning: Performing calculation and graphic work [Electronic resource] / S.M. Lapach. K.: KPI named after Igor Sikorskyi, 2020. 86 p.
10. Nazarenko L.A. Synopsis of lectures from the course "Planning and Processing of Experiment Results" / L.A. Nazarenko. Kharkiv: XNUMX named after OHM. Beketova, 2018. 163 p.
11. Polishchuk O.S. Scientific basis of design of electromechanical press equipment of light industry: thesis... Dr. Tech. Sciences: 05.05.10 / Kyiv National University of Technologies and Design. K., 2019. 372 p.
12. The search for the global optimum for the tasks of optimal design of systems or determination of optimal control laws [Electronic resource]. Access mode: <http://surl.li/ohxok> (access date: 12/15/23). Name from the screen.
13. Polishchuk O.S. Electromechanical press equipment at light industry enterprises: monograph / O.S. Polishchuk. Khmelnytskyi: PolyLux Publishing House, 2018. 285 p.
14. Horoneskul M.M. Tables of functions and critical points of distributions. Chapters: Probability theory. Mathematical statistics. Mathematical methods in psychology / M.M. Horoneskul. Kharkiv: Ukrainian State University, 2009. 90 p.
15. Colab [Electronic resource]. Access mode: <https://colab.research.google.com/> (access date 12.12.23). Name from the screen.