

УДК 66.001.5:693.546

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0612>**¹Денис Сідан,**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7945-5615>, e-mail: sidan-denis@meta.ua**¹Тетяна Нестеренко,**

доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій

ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2387-8575>, e-mail : poltava.tanya.nesterenko@gmail.com¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», просп. Першотравневий 24, м. Полтава, 36011, Україна

АНАЛІТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПІДБІР КОНСТРУКЦІЇ ШНЕКА ЕКСТРУДЕРА ДЛЯ АДИТИВНОГО ФОРМУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто конструктивно-технологічні особливості процесу подачі будівельних сумішей у зону друку будівельного 3D-принтера із використанням шнекового екструдера. Обґрунтовано визначальний вплив геометричних і кінематичних параметрів шнека на продуктивність екструзії, стабільність потоку та якість формування адитивного шару. Запропоновано аналітичний підхід до опису процесу шнекової екструзії, який враховує взаємодію конструктивних параметрів гвинтового органа (діаметр, крок витка, глибина каналу, ступінь стиснення) з реологічними властивостями в'язкопластичних будівельних сумішей.

Розроблено конструкцію дослідного екструдера та створено 3D-моделі шнеків із різними значеннями кроку гвинтової нарізки. Проведено експериментальні дослідження процесу подачі гіпсової суміші з визначенням крутного моменту на валу шнека та маси матеріалу, що транспортується за один оберт. Отримані експериментальні дані оброблено методами математичної статистики з використанням регресійного аналізу, у результаті чого встановлено кількісну залежність між кроком шнека та енергосиловими параметрами екструзії.

Підтверджено, що зменшення кроку шнека сприяє підвищенню масової продуктивності подачі, однак супроводжується зростанням крутного моменту та навантаження на привод екструдера. На основі побудованої поліноміальної регресійної моделі визначено характер впливу конструктивних параметрів шнека на робочі показники екструзійної системи та обґрунтовано раціональні діапазони їх вибору.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації екструдерів будівельних 3D-принтерів, підборі електроприводів, а також при оптимізації технологічних режимів адитивного виготовлення будівельних конструкцій із забезпеченням підвищеної якості формування шару та енергоефективності процесу друку.

Ключові слова: будівельний 3D-принтер, шнековий екструдер, будівельна суміш, подача матеріалу, крутний момент, параметри шнека, регресійна модель, якість друку, адитивне будівництво.

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL SELECTION OF SCREW EXTRUDER DESIGN FOR ADDITIVE FORMATION OF BUILDING STRUCTURES

ABSTRACT. The article examines the structural and technological features of the process of supplying building mixtures to the printing zone of a construction 3D printer using a screw extruder. The decisive influence of the geometric and kinematic parameters of the screw on extrusion productivity, flow stability, and the quality of additive layer formation is substantiated. An analytical approach to describing the screw extrusion process is proposed, taking into account the interaction between the design parameters of the screw working body (diameter, pitch, channel depth, compression ratio) and the rheological properties of viscoplastic building mixtures.

The design of an experimental extruder was developed, and 3D models of screws with different helix pitches were created. Experimental studies of gypsum mixture feeding were carried out with determination of the torque on the screw shaft and the mass of material transported per revolution. The obtained experimental data were processed using mathematical statistics methods and regression analysis, which made it possible to establish a quantitative relationship between screw pitch and the energy–power parameters of extrusion.

It was confirmed that reducing the screw pitch increases the mass productivity of material feeding but is accompanied by an increase in torque and drive load. Based on the constructed polynomial regression model, the nature of the influence of screw design parameters on the operating characteristics of the extrusion system was determined, and rational ranges for their selection were substantiated.

The obtained results can be used in the design and modernization of construction 3D printer extruders, in the selection of electric drives, and in the optimization of technological modes of additive manufacturing of building structures while ensuring improved layer formation quality and energy efficiency of the printing process.

Keywords: *construction 3D printer, screw extruder, building mixture, material feeding, torque, screw parameters, regression model, print quality, additive construction.*

1. Постановка проблеми. Адитивні технології у будівництві на сьогодні формують один із найбільш перспективних і технологічно динамічних напрямів розвитку сучасного машинобудування та будівельної індустрії. Застосування будівельних 3D-принтерів забезпечує автоматизацію процесу зведення конструкцій, зменшення трудомісткості та матеріаломісткості робіт, підвищення швидкості будівництва, а також відкриває можливості реалізації складних архітектурно-конструктивних форм, що практично недосяжні традиційними методами [2, 4, 5]. Упродовж останніх років у наукових і прикладних дослідженнях запропоновано широкий спектр конструктивних рішень будівельних 3D-принтерів — від порталних і консольних систем до роботизованих і мобільних комплексів великого будівельного масштабу [3, 6–9].

Ключовим технологічним вузлом будь-якого будівельного 3D-принтера є система подачі та формування будівельної суміші, центральним елементом якої виступає екструдер. Саме параметри та конструкція екструдера визначають стабільність екструзії, рівномірність формування шару, точність геометрії друку та адгезію між шарами, що безпосередньо впливає на міцність і довговічність готових конструкцій [9, 11, 12]. На відміну від полімерного 3D-друку, у будівельних технологіях екструзії підлягають цементні, гіпсові та композиційні суміші, які характеризуються неньютонівськими, в'язкопластичними та тиксотропними властивостями. Їх реологічна поведінка істотно залежить від швидкості зсуву, гранулометричного складу, водоцементного відношення та наявності модифікуючих добавок, що ускладнює забезпечення стабільної подачі матеріалу.

Найбільш поширеним типом екструзійних систем у будівельному 3D-друці є шнекові екструдери, які забезпечують примусову, безперервну та дозовану подачу суміші до формуючої головки [6, 11]. Ефективність їх роботи визначається конструктивно-геометричними параметрами шнека — діаметром, кроком витка, глибиною гвинтового каналу, ступенем стиснення, довжиною робочих зон і частотою обертання. Невідповідність цих параметрів властивостям суміші призводить до пульсацій подачі, розшарування матеріалу, утворення порожнин, підвищеного енергоспоживання або навіть до блокування екструдера й зриву процесу друку.

Особливої актуальності набуває задача підвищення якості подачі будівельної суміші в зону друку. Якість подачі визначається не лише продуктивністю, а й однорідністю структури потоку, відсутністю повітряних включень, стабільністю тиску в екструзійному каналі та узгодженістю швидкості видавлювання з траєкторією руху друкувальної головки. Саме ці фактори формують геометричну точність шару, його щільність і несучу здатність [11, 12].

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених загальним питанням будівельного 3D-друку, проблема обґрунтованого підбору конструкції шнека екструдера залишається недостатньо висвітленою. У більшості випадків використовуються адаптовані шнеки полімерних екструдерів або емпірично спроектовані гвинтові органи без урахування специфіки будівельних сумішей та режимів їх екструзії [2, 6, 7]. Відсутність системного підходу до параметричного синтезу конструкції шнека обмежує можливості підвищення якості друку та енергоефективності обладнання.

Крім того, у доступних наукових джерелах недостатньо представлено аналітико-експериментальні залежності між геометрією шнека та показниками процесу подачі — продуктивністю, тиском екструзії, крутним моментом на валу, структурною однорідністю суміші. Бракує також статистично обґрунтованих моделей, які дозволяли б прогнозувати якість подачі матеріалу залежно від конструктивних параметрів шнека та реологічних характеристик суміші.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження. Фундаментальні засади будівельного 3D-друку сформовано у працях, присвячених техно-логії контурного будівництва та роботизованому формуванню конструкцій, де визначено роль екструзійних систем у забезпеченні безперервності адитивного процесу [4]. Узагальнення інноваційних технологій 3D-друку будівельних об'єктів і класифікацію обладнання наведено в роботах [1, 6], де підкреслюється значення конструктивної адаптації екструдерів до властивостей сумішей.

Оглядом та популяризаційні видання з адитивного виробництва акцентують увагу на тому, що стабільність подачі матеріалу є ключовою інженерною проблемою масштабного 3D-друку [3]. У дослідженнях мегамасштабного друку та мобільних будівельних роботів показано тенденції до збільшення продуктивності екструзійних систем і необхідність узгодження їх параметрів із технолого-гією формування шару [2, 7, 8].

У роботах українських науковців розглянуто конструкції мобільних комплексів будівельних 3D-принтерів, лабораторних установок і екструзійних вузлів, що забезпечують подачу бетонних сумішей у зону друку [9, 10]. Аналітичні дослідження процесу депонування бетонної суміші екструдером дозволили встановити взаємозв'язок між параметрами подачі та якістю сформованого шару [11]. Також проведено аналіз конструкцій будівельних 3D-принтерів і визначено напрями вдосконалення їх екструзійних систем [12].

Разом із тим, наявні дослідження переважно зосереджені на компоновці обладнання, кінематиці позиціонування та технологічних режимах друку. Питання ж конструктивного синтезу шнека екструдера — з урахуванням геометрії гвинтового каналу, зональної організації процесу подачі та впливу цих параметрів на якість екструзії будівельних сумішей — залишаються недостатньо опрацьованими, що й зумовлює актуальність даного дослідження.

3. Мета і завдання дослідження. Метою роботи є обґрунтування та розроблення науково-методичного підходу до підбору конструкції шнека екструдера будівельного 3D-принтера, який на основі аналітичного моделювання та експериментальних досліджень забезпечить підвищення якості подачі будівельної суміші в зону друку, стабільність екструзії, зниження енергетичних витрат і розширення можливостей проектування ефективних екструзійних систем для адитивного виготовлення будівельних конструкцій.

Завданнями дослідження є розроблення науково обґрунтованого підходу до підбору конструкції шнека екструдера будівельного 3D-принтера з урахуванням реологічних і технологічних властивостей будівельних сумішей, формування узагальненої аналітичної моделі процесу шнекової екструзії, що описує взаємозв'язок між геометричними параметрами шнека (діаметр, крок витка, глибина каналу, ступінь стиснення, довжина робочих зон) і показниками подачі матеріалу, визначення впливу кінематичних режимів роботи (частоти обертання, крутного моменту, швидкості транспортування) на продуктивність, стабільність і рівномірність екструзії, аналіз напружено-деформованого та гідродинамічного стану суміші в гвинтовому каналі з урахуванням її ньютонівських в'язкопластичних властивостей, експериментальне дослідження процесу подачі будівельної суміші шнеками різної геометрії з оцінкою якості формування потоку та однорідності структури матеріалу, статистична обробка отриманих результатів і побудова регресійних залежностей між параметрами шнека та показниками якості подачі, а також обґрунтування раціональних конструктивно-кінематичних параметрів шнека екструдера з метою підвищення стабільності подачі будівельної суміші в зону друку та покращення якості формування адитивних будівельних шарів.

4. Основний матеріал

Шнекові пристрої (гвинтові механізми) широко застосовуються в транспортуючих, дозувальних і пресових машинах для переміщення, ущільнення та формування матеріалів різної природи. У загальному випадку шнековий механізм складається з циліндричного кожуха з приймальним бункером і формувальним вихідним отвором, усередині якого розміщений один або декілька шнеків. До основних переваг шнекових систем належать компактність, конструктивна простота, можливість регулювання подачі матеріалу та стабільність робочого процесу.

У будівельних 3D-принтерах шнековий екструдер виконує ключову функцію — забезпечує примусову, дозовану та безперервну подачу пластичної будівельної суміші (цементної або гіпсової) до формуючого сопла. Особливістю цього процесу є робота з в'язкопластичними матеріалами, які характеризуються значною внутрішньою адгезією, тертям та змінними реологічними властивостями.

Геометрія шнека шнека утворюється рухом твірної лінії (прямої або кривої) навколо та вздовж осі шнека. Осьовий розмір, що відповідає підйому цієї лінії за один повний оберт, називається кроком шнека H . Залежно від конструкції, шнеки можуть мати: постійний або змінний крок; постійний або змінний діаметр; безперервну або переривчасту гвинтову поверхню.

На рисунку 1. зображено типи шнеків які можна використовувати для подачі будівельної суміші з екструдера.

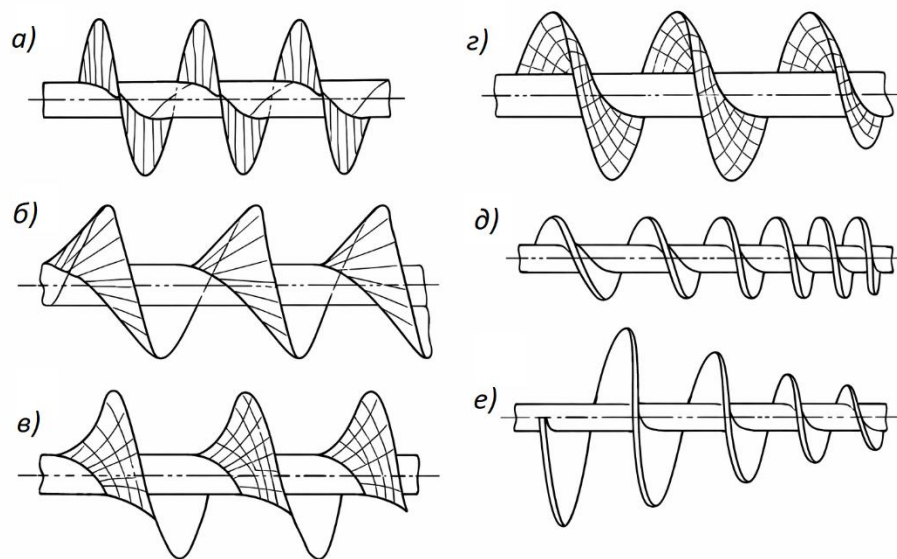


Рис. 1. Схеми шнеків із гвинтовою поверхнею: а – прямий; б – косий; в, г – кривий; д – зі змінним кроком; е – зі змінним діаметром

Fig. 1. Schemes of screws with a helical surface: a – straight; b – oblique; c, d – curved; d – with variable pitch; e – with variable diameter

Для аналітичного опису роботи шнека зручно розглядати розгортку гвинтової лінії на площину. При цьому отримується так званий шаговий трикутник, основа якого дорівнює довжині розгортки кола πD , а висота — кроку гвинтової лінії H . Кут між гвинтовою лінією та основою циліндра визначає кут підйому гвинтової лінії α , який обчислюється як:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\pi D}{H}, \quad (1)$$

Цей кут є одним з основних параметрів, що визначають здатність шнека до осьового переміщення матеріалу.

Рух частинок матеріалу в шнековому каналі є складним і відбувається не прямолінійно, а по гвинтових траєкторіях уздовж і навколо осі шнека. При відсутності тертя матеріал переміщувався б перпендикулярно до гвинтової поверхні, однак у реальних умовах на рух істотно впливають: тертя частинок матеріалу об поверхню шнека; внутрішнє тертя та адгезія між частинками матеріалу; протидіючий тиск у формувальній зоні (мундштуку).

За наявності сил тертя осьове переміщення частинок зменшується, що враховується введенням коефіцієнта відставання або коефіцієнта кінематичного зсуву. Осьовий шлях частинки за один оберт шнека можна подати у вигляді:

$$h = H(\cos \alpha - f \sin \alpha) \cos \alpha, \quad (2)$$

де f – коефіцієнт тертя матеріалу об гвинтову поверхню шнека.

З урахуванням цього ефективна подача матеріалу завжди є меншою за геометричний крок шнека, що особливо важливо для пластичних будівельних сумішей.

Продуктивність шнекового пристрою визначається об'ємом матеріалу, що транспортується за одиницю часу. Для шнеків, що працюють із пластичними матеріалами, продуктивність можна оцінити як добуток корисного міжвиткового об'єму на кутову швидкість обертання шнека:

$$Q = 0,125(D^2 - d^2)(H - \delta)k\rho\omega, \quad (3)$$

де D – зовнішній діаметр шнека; d – діаметр вала; δ – товщина витка; ρ – густина матеріалу; k – коефіцієнт заповнення міжвиткового простору; ω – кутова швидкість обертання шнека.

З формули випливає, що продуктивність істотно залежить від кроку шнека, а також від умов заповнення та реологічних властивостей матеріалу, що подається.

Для забезпечення подачі матеріалу шнек повинен долати сили тертя, внутрішній опір матеріалу та тиск у зоні формування. Крутний момент на валу шнека можна визначити з урахуванням осьового тиску матеріалу:

$$M = \frac{\rho H^3 \tan^2 \varphi k_1 k_2 k_3 k_4}{4\pi^2}, \quad (4)$$

де ρ – осьовий тиск матеріалу; φ – кут тертя; $k_1 k_2 k_3 k_4$ – коефіцієнти, що враховують ковзання матеріалу, активність останнього витка, боковий тиск та зміну тиску по зонах шнека.

Отриманий крутний момент є базовим параметром для підбору електроприводу екструдера будівельного 3D-принтера та оцінки енергетичної ефективності процесу друку.

Робота екструзійного обладнання залежить від конструктивних характеристик екструдера, серед яких основними є тип шнека, його профіль та режим обертання. Найбільш поширеними є шнекові екструдери, також відомі як черв'ячні преси, завдяки своїй здатності рівномірно транспортувати матеріал і мінімізувати утворення повітряних включень. Проте існують і безшнекові (дискові) екструдери, де для транспортування суміші використовується диск спеціальної форми. У складних випадках застосовують комбіновані черв'ячно-дискові екструдери, які забезпечують як змішувальний, так і екструзійний ефекти, особливо ефективні при роботі з багатокомпонентними сумішами.

Особливу увагу приділяють профілю каналу шнека, що може бути із змінною глибиною спірального каналу або змінним кроком. Це дозволяє адаптувати подачу суміші залежно від її фізичних характеристик та вимог до процесу друку. Вибір оптимальних параметрів шнека, таких як глибина та крок спірального каналу, сприяє збільшенню ефективності подачі суміші та поліпшенню кінцевої якості виробу.

Для досягнення однорідного потоку матеріалу і запобігання виникненню повітряних включень часто застосовують одношнекові екструдери без зони дегазації. Проте в разі підвищених вимог до якості кінцевого виробу використовують двошнекові або комбіновані системи з осцилюючим шнеком, які дозволяють досягати високої якості укладеного шару і підвищують щільність структури суміші.

Сучасне проектування систем екструзії для 3D друку є результатом глибокого вивчення реологічних властивостей матеріалів і ітеративного вдосконалення конструкцій. Параметри, як-от текучість і екструзабельність, мають ключове значення для оптимального функціонування системи та забезпечення високої якості будівельних конструкцій.

Система екструзії 3D-принтера є надзвичайно важливою частиною загального процесу аддитивного виробництва, особливо для будівельних конструкцій. Багато параметрів впливають на ефективність екструзії будівельних сумішей, серед яких критичними є конструкція екструдера, параметри екструзії, текучість та екструзабельність матеріалу.

Дизайн екструзійного бункера та системи подачі матеріалу часто є результатом ітеративного підходу, заснованого на реологічних властивостях матеріалів. Оптимальний дизайн передбачає бункер для завантаження матеріалу, гвинтовий транспортер, форсунку для формування виходу матеріалу, редукторний двигун для приводу шнека, а також скребок для перемішування, що забезпечує стабільну подачу матеріалу. Важливо враховувати діаметр бункера відповідно до розміру шнека та проектувати його з оптимальним кутом нахилу для забезпечення масового режиму руху, що мінімізує проблеми нестабільної течії, сегрегації матеріалів та деградації частинок у стоячих областях. Для друку цементних сумішей важливо уникати гострих кутів у бункері, що знижує тиск і забезпечує плавний потік матеріалу до екструдера.

Для екструзії неньютонівських псевдопластичних матеріалів, які характеризуються зменшенням в'язкості при зсуві, рекомендується встановлення лопастей або скребоків у бункері для перемішування суміші, що знижує ефективне зсувне напруження і сприяє однорідності матеріалу. Лопасті або скребки також можуть доповнюватися вібраційним мотором для підвищення текучості і щільності суміші. Така система дозволяє бункеру функціонувати як самостійна екструзійна установка для середніх розмірів друку, без необхідності додаткових насосів.

Підбір конструкції екструдера також є ключовим етапом у налаштуванні процесу 3D-друку. Розмір форсунки визначає вихідну форму матеріалу, що безпосередньо впливає на роздільну здатність друку та геометричну точність кінцевої структури. Залежно від розмірів та конструкції об'єкта форсунка може змінюватися, що дозволяє обирати оптимальні параметри для друку будівельних матеріалів. Наприклад, різні розміри форсунок дозволяють тестувати різні режими та зразки, що допомагає визначити найефективніші налаштування екструзії.

Як показують дослідження, ключовими параметрами, що впливають на успішність друку, є швидкість переміщення каретки, швидкість екструзії та висота шару. Для визначення оптимальних налаштувань друку використовуються 3D-моделі або експериментальні зразки. У дослідженні [16] прямокутний зразок розміром 150x150x100 мм використовувався для вивчення впливу таких параметрів, як швидкість руху каретки, висота шару та швидкість екструзії. Початкові налаштування показали, що висота шару 15 мм та швидкість каретки 30 мм/с не підходять, оскільки це призвело до неуспішного друку через нерівномірність шару. Коригування параметрів, зокрема, зменшення висоти шару до 10 мм та зниження швидкості руху каретки до 20 мм/с, дозволило досягти стабільного результату.

Спостереження за якістю нанесення шару вказують на важливість ретельного вибору параметрів друку для кожного конкретного випадку. Наприклад, при швидкості екструзії, налаштованій відповідно до швидкості обертання двигуна, можна оптимізувати подачу матеріалу в залежності від його реологічних властивостей, забезпечуючи належну якість друку.

В якості початкового параметра для розрахунку 3d будівельного принтера встановлюється основний параметр - діаметр шнека D .

Крок нарізки t та глибина витка h суттєво впливають на продуктивність шнекової машини 3D-принтера. Крок витка в зоні завантаження визначається не тільки коефіцієнтом тертя матеріалу о шнек і стінки матеріального циліндра, але й швидкістю подачі матеріалу

для друку та вимогами щодо якості друку. Для зони завантаження рекомендується приймати крок від 0,7 до 1,5D, з урахуванням специфічних вимог 3D-принтера.

Для зони дозування нарізка шнека може враховувати властивості матеріалів, які використовуються в 3D-друці, такі як температурна чутливість, і забезпечувати необхідну точність друку. Рекомендується враховувати основні параметри: швидкість та стабільність подачі матеріалу для друку при виборі кроку нарізки t .

Додатково, при роботі з цементною або гіпсовою сумішшю, важливо враховувати їхні особливості, такі як в'язкість та температурні умови для досягнення оптимальних результатів друку. Також слід розглядати вибір матеріалів шнека та конструктивні особливості з урахуванням вимог, що стосуються обробки цементної або гіпсової суміші.

$$t = (0,8 \dots 1,2)D, \quad (5)$$

У контексті 3D-принтера, де точність і рівномірність подачі матеріалу є критичними факторами для якості друку, обрання кроку нарізки t рівним діаметру шнека ($t = D$) може бути важливим кроком для забезпечення оптимальних умов друку. Це дозволяє досягти не тільки стабільної і рівномірної подачі матеріалу, але також спрощує технологічний процес виготовлення шнека для 3D-принтера.

Додатково, для досягнення високих ступенів стиснення матеріалу при друці можуть бути використані шнеки зі змінним за довжиною кроком нарізки. Це може бути корисно для регулювання параметрів друку в залежності від властивостей конкретного матеріалу та вимог до якості друку.

При виборі глибини винтового каналу важливо враховувати особливості матеріалу, які використовуються у 3D-друці, такі як температурна чутливість та потреба в точності друку. Рекомендації щодо глибини винтового каналу можуть бути адаптовані з урахуванням конкретних умов та вимог, характерних для 3D-принтера та матеріалів, які використовуються.

Для 3D-принтера важливим є не лише оптимальна глибина винтового каналу в зонах питання та дозування, але і врахування особливостей процесу друку.

У зоні завантаження, глибина винтового каналу також повинна враховувати можливі варіації властивостей матеріалу та його подачу в принтер.

$$h_1 = (0,12 \dots 0,16)D, \quad (6)$$

В зоні дозування для 3D-принтера, крім забезпечення точності друку, важливо враховувати потреби в рівномірній подачі матеріалу та можливість швидкого регулювання глибини винтового каналу для адаптації до різних умов друку та властивостей матеріалу.

$$h_3 = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right], \quad (7)$$

Вибір ступеня стиснення матеріалу (i) на основі Таблиці 2.1 визначається врахуванням конкретних рекомендацій для кожного матеріалу та виду виробу.

Вибір ступеня стиснення матеріалу (іноді також називається "ступенем живлення") для цементних або гіпсових сумішей може залежати від типу шнеку та його конструктивних параметрів. У загальному випадку, ступінь стиснення визначається відношенням глибини каналу в зоні живлення (поживлення) до глибини каналу в зоні дозування.

Ступінь стиснення цементної або гіпсової суміші залежить від декількох факторів, включаючи тип шнека. Шнек - це обертовий елемент, який використовується для перемішування та подачі матеріалу. Тип шнека може впливати на ступінь стиснення суміші наступними способами:

Діаметр шнека: Шнек з меншим діаметром створює більший тиск на суміш, що може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Швидкість шнека: Шнек з більшою швидкістю створює більший відцентровий тиск на суміш, що також може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Кут нахилу шнека: Шнек з більшим кутом нахилу створює більший обертовий момент, що також може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Загалом, шнеки з меншим діаметром, більшою швидкістю та більшим кутом нахилу будуть створювати більший тиск на суміш, що може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Однак, важливо зазначити, що тип шнека не є єдиним фактором, який впливає на ступінь стиснення. Інші фактори, які можуть впливати на вибір ступеня стиснення, включають швидкість виходу матеріалу, величину і тип зерен матеріалу, його вологості та інші властивості.

З таблиці 1 можна взяти значення середнього градієнта швидкості зсуву γ , числа витків в зоні дозування, і відношення глибини каналу в зоні живлення та дозування для конкретного матеріалу та типу виробу.

Загальною метою визначення глибини винтового каналу для 3D-принтера є забезпечення стабільної та точної подачі матеріалу в процесі друку, що є ключовим для отримання високоякісних та деталізованих друківаних будівельних конструкцій.

Таблиця 1. Конструктивні параметри шнеків для викори-стання в 3D-принтерах
Table 1. Design parameters of auger for use in 3D printers

Полімерний матеріал	Середній градієнт швидкості зсуву γ , c^{-1}	Число витків в зоні дозування
Гіпсова суміш	15...20	4...6
Цементна суміш	10...23	3...6

Глибина винтового каналу, кількість витків та коефіцієнт стиснення визначаються з урахуванням властивостей конкретного матеріалу та типу виробу для досягнення оптимальних умов обробки.

У зоні пластифікації (стиснення).

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} L_0, \quad (8)$$

$$L_0 = L - L_H, \quad (9)$$

де L – довжина шнека, см; L_0 – довжина шнека до зони стиснення, см; L_H – довжина тикової частини шнека, см.

$$L_H = (0.4 \dots 0.6)L, \quad (10)$$

Ширина гребня витка шнека e рекомендується приймати такою, щоб уникнути збільшення потужності, оскільки збільшення товщини витка призводить до зростання витрати енергії, тоді як зменшення її може призвести до утворення значного потоку витоків через зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека.

$$e = (0,06 \dots 0,1)D, \quad (11)$$

Менші значення рекомендується приймати для діаметрів шнека більше 125 мм, тоді як більші значення – для діаметрів менше 125 мм. Радіальний зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека рекомендується приймати

$$\delta = (0,002 \dots 0,005)D, \quad (12)$$

При цьому менші значення приймаються для великих діаметрів шнеків. Частота обертання шнека суттєво впливає на продуктивність шнекових машин. Її зростання спостерігається до певного значення частоти обертання шнека (критичного), після чого починається нестійке рух матеріалу (частинки матеріалу припиняють рухатися в осьовому напрямку і лише обертаються разом із шнеком). Це призводить до зменшення

продуктивності, збільшення споживаної потужності та збільшеного зносу робочих частин машини.

Величину критичної частоти обертання шнека в зоні завантаження шнекової машини можна визначити за наступним співвідношенням (с- 1):

$$n_{крит} = \frac{42,2}{60\sqrt{D}}, \quad (13)$$

де D – діаметр шнека, м

В зонах стиснення і дозування допустиму частоту обертання шнеків значно зменшують, щоб уникнути через мірного витіснення суміші.

Робоча частота обертання шнека дорівнює

$$n_p = (0,2 \dots 0,7)n_{крит}, \quad (14)$$

де нижні значення числових коефіцієнтів приймаються для малих діаметрів шнеків, верхні - для великих значень. На практиці частота обертання знаходиться в межах від 0,08 до 4,2 с⁻¹.

За наведеними формулами визначено наступні конструктивні розміри шнека для створення дослідного стенда пристосування, що дозволить визначити крутний момент шнека який потрібний для роботи бункера – екструдера та дозволить в майбутньому підібрати електроприводи принтера.

Прийнято шнек діаметром 38мм, висотою 42,5 мм. Та зовнішню частину – бункер із отвором для видавлювання гіпсової суміші діаметром 12 мм.

За допомогою програми SolidWorks було створено спіраль моделі шнека (рисунок 2) в двох варіантах. Перший варіант із шагом 17 мм другий варіант із шагом 12 мм.

Варіант моделі шнека із шагом 12 мм зроблено таким чином, що спіраль нахилена на 300 відносно горизонталі в низ. 3D моделі обох шнеків зображено на рисунку 3.

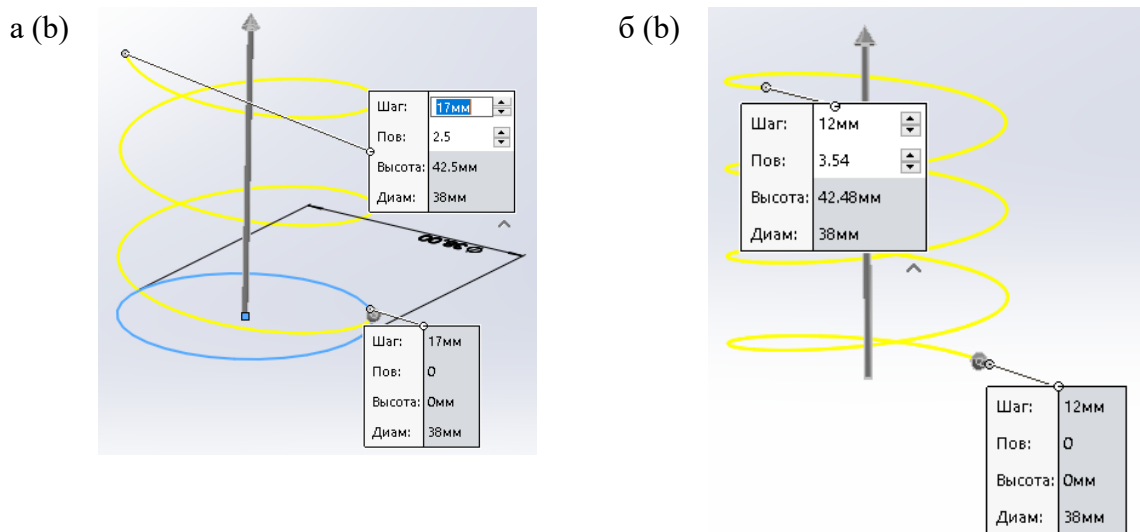
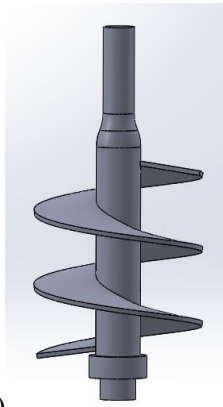


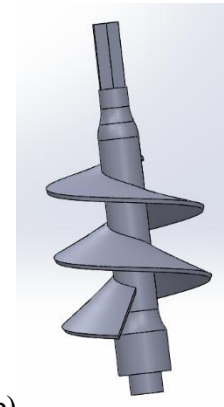
Рис. 2. Спіраль моделі шнека: а) із шагом 17 мм б) із шагом 12 мм
 Fig. 2. Spiral of the screw model: a) with a pitch of 17 mm b) with a pitch of 12 mm

Корпус бункера (рисунок 4) спроектовано таким чином щоб можна було провести дослідження із визначення крутного моменту шнека для роботи екструдера.

Також розроблена модель складального креслення пристосування для визначення крутного моменту шнека (Рисунок 5). Процес формування слоїв при друку на 3D-принтері відбувається поетапно шар за шаром до отримання проектної висоти.



а (a)



б (b)

Рис. 3. 3D моделі шнека: а) із шагом 17 мм б) із шагом 12 мм
 Fig. 3. 3D model of auger: a) in increments of 17 mm b) in increments of 12 mm

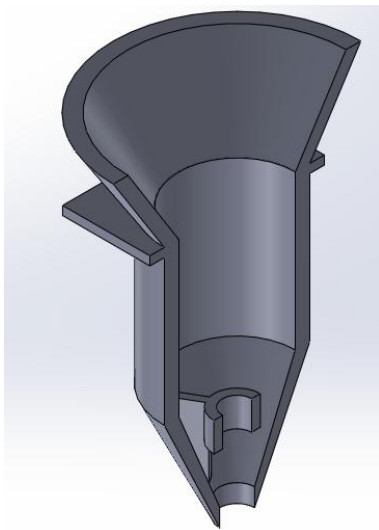


Рис. 4. 3D модель бункера
 Fig. 4. 3D model of the bunker

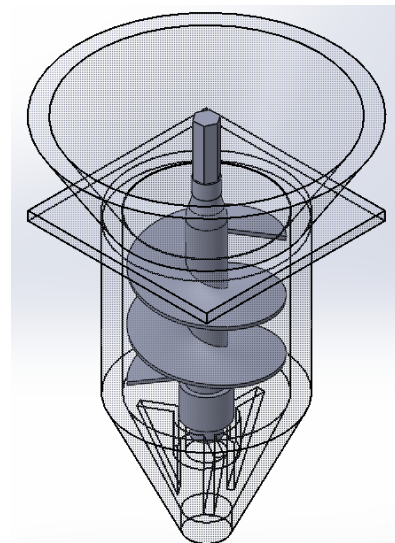


Рис. 5. 3D модель експериментального пристосування
 Fig. 5. 3D model of the experimental plant

Експериментальні дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій повинно забезпечити проведення дослідження стосовно визначення крутного моменту який виникає на валу шнека для подальшого підбору електроприводу принтера.

За допомогою принтера для друку пластиком було виготовлені елементи екструдера (рис. 6).



Рис. 6. Роздруковані елементи екструдера
 Fig. 6. Fractured extruder elements

Дослід із визначення крутного моменту для шнека проводився наступним чином. На спеціальний штатив було закріплено екструдер в який було подано гіпсову суміш. Через плече 0,2 м було прикладене через кантер зусилля. Дослід проводився по 6 разів для кожного типу шнека.

В таблиці 2 наведено результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 14 мм.

Таблиця 2. Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 14 мм
Table 2. Research results and research calculations for a auger with a pitch of 14 mm

№ дослідю	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	1,60	0,2	0,320	32
2	1,52	0,2	0,304	35
3	1,48	0,2	0,296	38
4	1,62	0,2	0,324	29
5	1,54	0,2	0,309	41
6	1,36	0,2	0,273	39

В таблиці 3 наведено результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 12 мм.

Таблиця 3. Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 12 мм
Table 3. Research results and research calculations for a auger with a pitch of 12 mm

№ дослідю	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	1,85	0,2	0,370	44
2	1,80	0,2	0,360	48
3	1,76	0,2	0,352	47
4	1,92	0,2	0,384	43
5	1,84	0,2	0,368	49
6	1,96	0,2	0,392	48

Таблиця 4. Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 16 мм
Table 4. Research results and research calculations for a auger with a pitch of 16 mm

№ дослідю	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м)	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	2,18	0,2	0,436	34
2	1,96	0,2	0,392	38
3	2,23	0,2	0,446	42
4	2,32	0,2	0,464	36
5	2,04	0,2	0,408	40
6	2,11	0,2	0,422	32

Для шнека з шагом 14 було визначено кількість суміші яка виходила з екструдера при силах 1,60Н; 1,52Н; 1,48Н; 1,62Н; 1,54Н; 1,36Н видавалося гіпсової суміші 32 г; 35 г; 38 г; 29 г; 41 г; 39 г. Для шнека з шагом 12 було визначено кількість суміші яка виходила з екструдера при силах 1,85Н; 1,80Н; 1,76Н; 1,92Н; 1,84Н; 1,96Н видавалося гіпсової суміші 44 г; 48 г; 47 г; 43 г; 49 г; 48г.

Теоретичні основи обробки експериментальних даних

Побудова та дослідження статистичної матмоделі зводиться до:

- попередньо дослідження об'єкту;
- вибір критерію оптимізації;
- побудови статистичної матмоделі і оцінки її адекватності та відтворюваності;
- можливості використовувати дану модель для оптимізації процесу та установаження найраціональніших параметрів системи.

З метою визначення ступеню впливу фактору на критерії оцінки потрібно шляхом проведення експерименту установити залежність, яка досягається проведенням апроксимації.

Самим точним методом апроксимації вважають метод поліноміального опису даного процесу з використанням рівняння регресії, що у загальному випадку може бути представлено у вигляді:

Поліноміальна модель для проведення досліджень має вигляд

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{j=1}^k a_{ij} x_i x_j, \quad (15)$$

де $i, j = 1, 2, \dots, k$ – порядкові номери факторів; y_i – величина, яка оптимізується; x_i, x_j – вхідні фактори у кодованій формі; k – кількість факторів; a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} – коефіцієнти рівняння регресії.

Для визначення коефіцієнтів рівняння використовуються наступні формули

$$a_0 = \bar{y}_0, \quad (16)$$

$$a_i = A \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot y_u, \quad (17)$$

$$a_{ii} = B \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C_1 \sum_{j=1}^k \sum_{u=1}^N x_{ju}^2 y_u - \frac{y_0}{S}, \quad (18)$$

$$a_{ij} = D_1 \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u, \quad (19)$$

де \bar{y}_0 – середнє значення спостережень, зроблених у нульовій точці; N – число точок експерименту плану; A, B, C_1, D_1, S – постійні коефіцієнти, що визначаються структурою матриці планування.

Вибіркова дисперсія в u -ому досліді визначається за формулою

$$S_{yu}^2 = \frac{1}{\gamma_u - 1} \sum_{i=1}^{\gamma_u} (y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (20)$$

де $f_u = (\gamma_u - 1)$ – ступень свободи; $\bar{y}_u = \frac{1}{\gamma_u} \sum_{i=1}^{\gamma_u} y_{ui}$ – математичне сподівання функції відгуку в u -тій точці експерименту.

Значимість коефіцієнтів регресії визначається за t -критерієм Стюдента. Коефіцієнт регресії вважається значущим, якщо

$$t_{\text{факт}} = \frac{a}{S_{(a_0, i, ii, ij)}} > t_{\text{табл}}, \quad (21)$$

де $S_{(a)}$ – дисперсія, що характеризує помилки у визначенні коефіцієнтів.

Вона визначається за формулами

$$S_{(a_0)}^2 = \frac{1}{n_0} S_{(y)}^2, \quad (22)$$

$$S_{(a_i)}^2 = A S_{(y)}^2, \quad (23)$$

$$S_{(a_{ii})}^2 = \left(B + \frac{1}{S^2 n_0} \right) S_{(y)}^2, \quad (24)$$

$$S_{(a_{ij})}^2 = D_1 S_{(y)}^2, \quad (25)$$

$$\text{де } S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}.$$

Адекватність отриманої моделі результатам експерименту перевіряють за умовою Фішера

$$F \leq F_{табл}, \quad (26)$$

де $F_{табл}$ – табличне значення F-розподілу; $F = \frac{SS_L \cdot f_E}{SS_R \cdot f_L}$ – дисперсійне відношення; $SS_L = SS_R - SS_E$ – сума квадратів, пов'язана з дисперсією, що визначає неадекватність представлення результатів експерименту; $SS_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2$ – сума квадратів, пов'язана з дисперсією, що характеризує похибку досліду; $SS_R = \left[\sum_{u=1}^N y_u^2 - \frac{(\sum_{u=1}^N y_u)^2}{N} \right] - SS$ – остаточна сума квадратів.

Сума квадратів, пов'язана з отриманими коефіцієнтами регресії

$$SS = A \sum_{i=1}^k \left(\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u \right)^2 + D_1 \sum_{i=1}^{m_1} \left(\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u \right)^2 + b_0 \sum_{u=1}^N y_u - \sum_{i=1}^k b_{ii} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - \frac{\left(\sum_{u=1}^N y_u \right)^2}{N} \quad (27)$$

Обробка результатів експериментальних даних.

Проведемо регресійного аналізу результатів однофакторного експерименту з використання системи STATISTICA. Зазначимо, що задача регресійного аналізу полягає в тому, щоб за дослідженнями вхідного (X) і вихідного (Y) параметрів:

- побудувати регресійну модель (рівняння регресії), тобто оцінити параметри моделі (коефіцієнти рівняння) найкращим чином;
- побудувати довірчі інтервали для коефіцієнтів моделі;
- перевірити гіпотезу значущості коефіцієнтів рівняння регресії;
- оцінити ступінь адекватності моделі і т.д.

Очевидно, що величина крутного моменту залежить від кроку шнека, тому залежною змінною (критерієм) Y є крутий момент, а незалежною змінною (фактором) X – крок шнеку.

Проведення регресійного аналізу відбуватиметься у кілька етапів. Побудуємо діаграму розсіювання експериментальних даних та графік для підгонки моделі оцінювання (та графіки з довірчим інтервалом 0,95) (рис. 7).

Із аналізу дослідних даних, розміщених на графічному відображенні результатів, робиться висновок про можливість побудови поліноміальної регресійної моделі другого порядку.

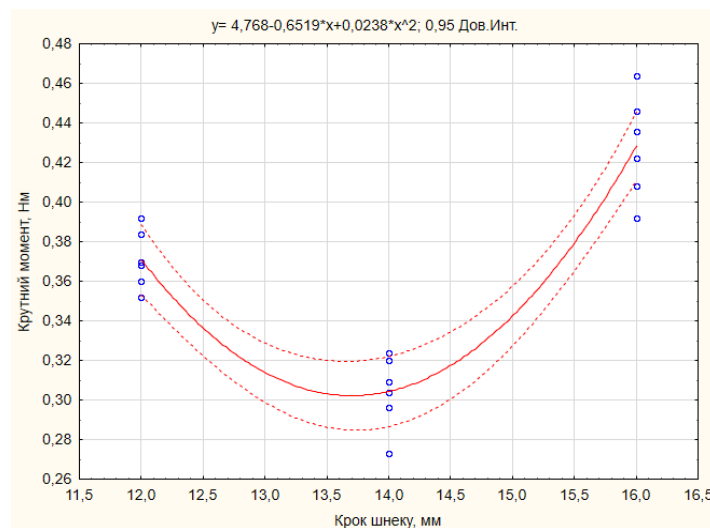


Рис. 7. Діаграма розсіювання експериментальних даних та графік для підгонки моделі оцінювання
Fig. 7. Scatter plot of experimental data and plot for fitting the estimation model

Із аналізу дослідних даних, розміщених на графічному відображенні результатів, робиться висновок про можливість побудови поліноміальної регресійної моделі. Для побудови поліноміальної регресійної моделі в діалоговому вікні задається, що модель оцінювання «Fit» є поліноміальною «Polynomial» і натискається клавіша «ОК». В результаті

проведених операцій в окремому вікні відображається графік, у якому на точкові дані нанесена крива, яка автоматично описується рівнянням 2-го порядку (рис. 7). Рівняння многочлена представлено в заголовку графіка і має наступний вигляд:

$$Y=4.768-0.6519X+0.0238X^2, \quad (28)$$

Абсолютна величина кожного коефіцієнта в рівнянні регресії характеризує вплив фактора X на функцію відгуку (критерій) Y .

Для того, щоб проаналізувати регресійну модель, із головного меню системи статистика вибираємо пункт User-specified regression ($v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2$).

В якості методу оцінювання виберемо загальноприйнятий для технічних систем – квазіньютонівський. В методах нелінійного оцінювання важливо вірно підібрати початкові наближення.

Невідомими параметрами моделі є коефіцієнти b_0 , b_1 , b_2 . Натиснувши клавішу «Start values», відображається діалогове вікно, у якому потрібно ввести початкові значення, що отримані на основі попереднього графічного аналізу даних. Після дисперсійного аналізу отримаємо, уточнені значення коефіцієнтів b_0 , b_1 , b_2 (рис.8) та графік результуючої регресійної кривої, накладеної на дослідні дані (рис.9).

N=18	b0	b1	b2
Оцінка	4.768000	-0.651901	0.023791

Рис. 8. Результати розрахунку коефіцієнтів регресійної моделі
Fig. 8. Results of calculating the coefficients of the regression model

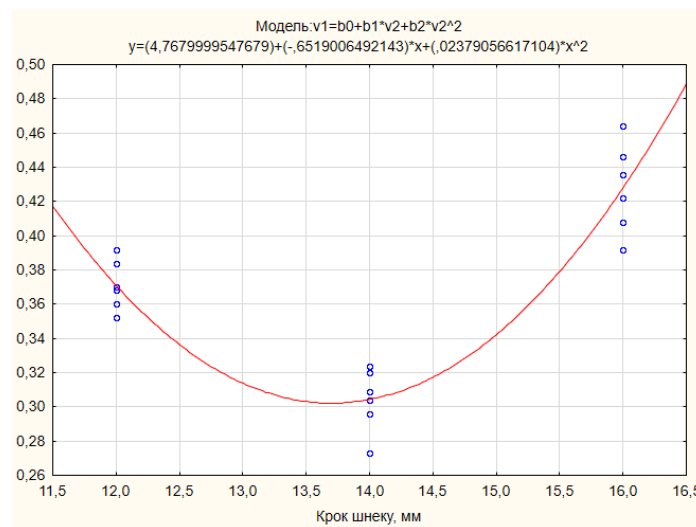


Рис. 9. Графік результуючої регресійної кривої, накладеної на дослідні дані
Fig. 9. Graph of the resulting regression curve superimposed on the experimental data

Тоді рівняння (28) можна переписати у вигляді

$$M=4.768-0.6519k+0.023791k^2, \quad (29)$$

де M – крутний момент, Нм; K – крок шнеку, мм.

З метою перевірки достовірності отриманого рівняння визначимо залишки, які отримані в результаті різниці між даними спостережень та результатами розрахунків за рівнянням 29 (рис. 10, 11).

Модель: $v_1 = b_0 + b_1 \cdot v_2 + b_2 \cdot v_2^2$			
Зал. Змінна: Крутний момент, Нм			
	Дані спостереження, Нм	Результати розрахунків за	Залишки
1	0,370000	0,371034	-0,001034
2	0,360000	0,371034	-0,011034
3	0,352000	0,371034	-0,019034
4	0,384000	0,371034	0,012966
5	0,368000	0,371034	-0,003034
6	0,392000	0,371034	0,020966
7	0,320000	0,304342	0,015658
8	0,304000	0,304342	-0,000342
9	0,296000	0,304342	-0,008342
10	0,324000	0,304342	0,019658
11	0,309000	0,304342	0,004658
12	0,273000	0,304342	-0,031342
13	0,436000	0,427975	0,008025
14	0,392000	0,427975	-0,035975
15	0,446000	0,427975	0,018025
16	0,464000	0,427975	0,036025
17	0,408000	0,427975	-0,019975
18	0,422000	0,427975	-0,005975

Рис. 10. Розрахунок залишків між експериментальними даними та за отриманим рівнянням регресії

Fig. 10. Calculation of residuals between experimental data and the obtained regression equation

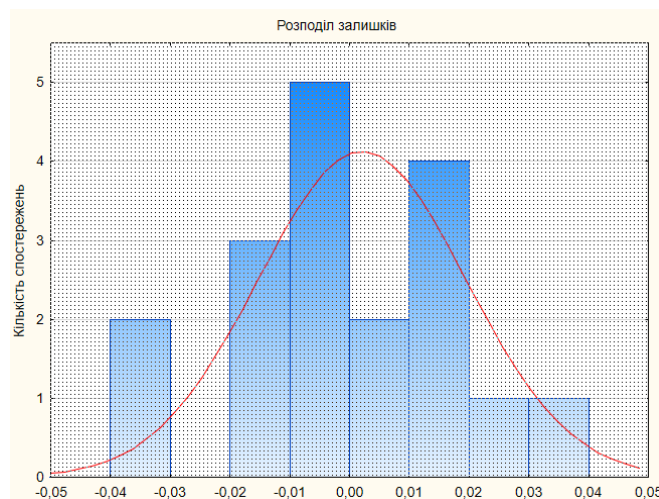


Рис. 11. Розподіл залишків
Fig. 11. Distribution of residuals

Проведемо дисперсійний аналіз результатів експерименту (рисунок 12), з метою перевірки значущості впливу кроку шнеку на значення крутного моменту. В стартовому вікні модуля «ANOVA» виберемо тип аналізу «One-way ANOVA» і метод «Quick specs dialog». Після натиснення клавіші «ОК» в правому верхньому кутку вікна відкривається меню установки змінних і опцій аналізу.

	1 Крутний момент, Нм	2 Крок шнеку, мм
1	0,37	12
2	0,36	12
3	0,352	12
4	0,384	12
5	0,368	12
6	0,392	12
7	0,32	14
8	0,304	14
9	0,296	14
10	0,324	14
11	0,309	14
12	0,273	14
13	0,436	16
14	0,392	16
15	0,446	16
16	0,464	16
17	0,408	16
18	0,422	16

Рис. 12. Вибіркові дані

Fig. 12. Sample data

Факторною змінною є «Крок шнеку», а результуючою – «Крутний момент». Для їх введення потрібно натиснути клавішу «Variables» у вікні установки змінних та опцій аналізу та вибрати відповідні змінні у вікні аналізу.

Наступний етап передбачає вибір рівня значущості «Significance level», який задаємо рівним $\alpha=0,05$ і натискаємо клавішу «All effects».

При цьому відкривається вікно з результатами розрахунку компонентів варіації і перевірки гіпотези впливу фактору на результат з використанням статистики Фішера. Проаналізуємо отримані результати (рис. 13). Під час аналізу результатів рядок «Intercept» (Вільний член рівняння) не враховуємо.

Ефект	Сума квадратів, SS	Ступінь свободи свободи	Середній квадрат, MS	Критерій Фішера	Ймовірність, p
Вільний член рівняння	2,434689	1	2,434689	5868,291	0,00
Крок шнеку, мм	0,045974	2	0,022987	55,405	1,18E-7
Помилка	0,006223	15	0,000415		

Рис. 13 Вікно результатів однофакторного дисперсійного аналізу

Fig. 13 Shows the results of one-way analysis of variance

Розрахували компоненти «Сума квадратів» (SS) 0,045974 і 0,006223 загальної варіації, яка обумовлена фактором «Крок шнеку» і неврахованими факторами. Відбулося визначення числа ступенів вільності («Degr. of Freedom») кожного компоненту. Зокрема, для компоненту варіації, що обумовлений факторною змінною, число ступенів вільності $(m-1)=2$, а для компоненту, обумовленого неврахованими факторами, число ступенів вільності дорівнює $m(n-1)=15$.

Розрахована величина «Середній квадрат» («MS») $Q_1^2/(m-1)=0.022987$ $Q_2^2/m(n-1)=0.000415$

Розрахували величину критерію Фішера, яка дорівнює:

$$F = \frac{Q_1^2/(m-1)}{Q_2^2/m(n-1)} = 55,405$$

При цьому система визначила ймовірність $p=0,0000000118$ того, що при справедливості нульової гіпотези ($F > F_\alpha$ – розрахункове значення; F_α – критична межа розподілу Фішера при рівні значущості) величина α може приймати такі ж, чи більші

значення. Оскільки ця ймовірність суттєво менша рівня значущості $\alpha=0,05$, то гіпотеза про вплив фактора «Крок шнеку» на значення крутного моменту є істинною.

5. Висновки

У результаті виконаного дослідження вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення якості подачі будівельної суміші в зону друку шляхом обґрунтованого підбору конструкції шнека екструдера будівельного 3D-принтера. На основі аналітичного розгляду процесу шнекової екструзії встановлено взаємозв'язок між геометричними параметрами шнека (діаметр, крок витка, глибина каналу, ступінь стиснення) та продуктивністю, енергетичними характеристиками й стабільністю подачі в'язкопластичних будівельних сумішей. Показано, що ефективність транспортування матеріалу визначається не лише геометричним кроком, а й реологічними властивостями суміші, коефіцієнтами тертя та протидіючим тиском у формувальній зоні.

У процесі експериментальних досліджень, виконаних на розробленому лабораторному пристосуванні, визначено крутний момент на валу шнека та масу суміші, що подається за один оберт, для різних значень кроку гвинтової нарізки. Отримані результати підтвердили суттєвий вплив кроку шнека на енергосилові та продуктивні параметри екструзії: зменшення кроку забезпечує зростання маси подачі за оберт, але супроводжується збільшенням крутного моменту та навантаження на привод.

Методами регресійного аналізу побудовано статистичну модель залежності крутного моменту від кроку шнека у вигляді поліноміального рівняння другого порядку, що адекватно описує експериментальні дані. Перевірка моделі за критеріями Стьюдента та Фішера підтвердила її статистичну значущість і можливість використання для інженерних розрахунків і прогнозування робочих параметрів екструдерів. Встановлено, що фактор «крок шнека» має визначальний вплив на величину крутного моменту, що необхідно враховувати під час підбору електроприводу 3D-принтера.

Практичним результатом роботи є обґрунтування раціональних конструктивних параметрів шнека екструдера, розроблення його 3D-моделей та створення експериментального стенда для дослідження процесу подачі будівельних сумішей. Отримані залежності та рекомендації можуть бути використані при проектуванні екструзійних вузлів будівельних 3D-принтерів, модернізації існуючого обладнання та оптимізації режимів адитивного формування будівельних конструкцій з підвищеними вимогами до якості шару та енергоефективності процесу.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні експериментальної бази для різних типів будівельних сумішей (цементних, гіпсових, композиційних), дослідженні багатощнекових і комбінованих екструдерів, а також у розробленні комплексних реологічно-механічних моделей процесу екструзії з урахуванням нестационарних режимів 3D-друку.

Список використаних джерел:

1. Шатов С.В., Савицький Н.В., Карпушин С.А. (2017). Узагальнення інноваційних технологій 3D-друку будівельних об'єктів для розробки стартапів. Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Серія: Створення високотехнологічних екокомплексів на основі концепції збалансованого (стійкого) розвитку, 99, 194-200.
2. Alwi A., Karayiannis S., Starkey B., Gardner M., Reodique K., Varley Th. (2013). «Contrucktion». MegaScale 3D Printing, Group 1: Final Report. Faculty of Engineering and Physical Sciences University of Surrey. [Electronic resource]. - Access mode: <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/R.Webb/MDDP/2012/Report/3D%20Building%20Printer%20-%20Group%201.pdf>
3. Lipson H., Kurman M. (2013). Fabricated: The New World of 3D Printing. Indiana: Wiley.
4. Khoshnevis. B. (2004). Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. Automation in construction, 13(1). 5-19. <https://doi.org/10.1016/j>

5. Shatov S., Savytskyi M. & Marchenko I. (2019). Improvement of 3D printing object equipment. Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture. 1. 90-101. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261119.91.593>
6. Savytskyi N. V., Shatov S. V., Ozhyshchenko O. A. (2016). 3D-printing of build objects. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 3. 18-26.
7. Kuhudzai R.J. (2022). Apis Cor Is Ready to Scale Up The 3D-Printed Home & Building Sector With Its Advanced Compact Mobile Robot Tech. [Electronic resource]. - Access mode: <https://cleantechnica.com/2022/02/09/apis-cor-is-ready-to-scale-up-the-3d-printed-home-building-sector-with-its-advanced-compact-mobile-robot-tech/>
8. К. Мок. (2018). Huge Modular 3D Printer Creates \$1,000 Tiny House Out of Mud. [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.treehugger.com/gaia-house-d-printed-out-mud-wasp-4857768>
9. Mobile complex of equipment for 3D printing / М. Nesterenko, О. Orysenko, І. Zhyla, D. Sidan // ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2023. – Т. 1 (60). – С. 12–18. – doi:<https://doi.org/10.26906/znp.2023.59.0000>
10. Лабораторний будівельний 3D принтер / М.М. Нестеренко, О.В. Орисенко, Д.О. Сідан, А.В. Шокало // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2022)», 10-11 листопада 2022 р. – Кропивницький : Ексклюзив-Систем, 2022. – С. 223–224.
11. Orysenko O. The analytical investigation of the concrete mixture deposition process by the concrete 3d printer extruder / О. Orysenko, М. Nesterenko, А. Shokalo // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво = Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering / голов. ред. С.Ф. Пічугін. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2022. – Вип. 2 (59). – С. 5–10. – <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.3093>
12. Orysenko O.V. Design of 3D printers analysis for construction and architecture / Oleksandr Orysenko, Mykola Nesterenko, Artem Shokalo, Tetiana Nesterenko // Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво = Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering / Нац. ун-т «Полтав. політехніка ім. Юрія Кондратюка». – Полтава : 2021. – Вип. 2 (57). – С. 105–110.

References:

1. Shatov, S.V., Savytskyi, N.V., & Karpushyn, S.A. (2017). Uzahalennia innovatsiinykh tekhnolohii 3D-druku budivelnnykh ob'ektiv dlia rozrobky startapiv [Generalization of innovative technologies of 3D printing of construction objects for startup development]. Budivnytstvo. Materialoznavstvo. Mashynobuduvannia. Seria: Stvorennia vysokotekhnolohichnykh ekokompleksiv na osnovi kontseptsii zbalansovanoho (stiikoho) rozvytku, 99, 194–200.
2. Alwi, A., Karayiannis, S., Starkey, B., Gardner, M., Reodique, K., & Varley, Th. (2013). Construction: MegaScale 3D Printing. Group 1 Final Report. Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey. Retrieved from: <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/R.Webb/MDDP/2012/Report/3D%20Building%20Printer%20-%20Group%201.pdf>
3. Lipson, H., & Kurman, M. (2013). Fabricated: The New World of 3D Printing. Indiana: Wiley.
4. Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. Automation in Construction, 13(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/j>
5. Shatov, S., Savytskyi, M., & Marchenko, I. (2019). Improvement of 3D printing object equipment. Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture, 1, 90–101. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261119.91.593>
6. Savytskyi, N.V., Shatov, S.V., & Ozhyshchenko, O.A. (2016). 3D-printing of build objects. Visnyk Prydniprov'skoi Derzhavnoi Akademii Budivnytstva ta Arkhitektury [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture], 3, 18–26.
7. Kuhudzai, R.J. (2022). Apis Cor is ready to scale up the 3D-printed home & building sector with its advanced compact mobile robot tech. Retrieved from: <https://cleantechnica.com/2022/02/09/apis-cor-is-ready-to-scale-up-the-3d-printed-home-building-sector-with-its-advanced-compact-mobile-robot-tech/>
8. Mok, K. (2018). Huge modular 3D printer creates \$1,000 tiny house out of mud. Retrieved from: <https://www.treehugger.com/gaia-house-d-printed-out-mud-wasp-4857768>

9. Nesterenko, M., Orysenko, O., Zhyla, I., & Sidan, D. (2023). Mobile complex of equipment for 3D printing. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(60), 12–18. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.59.0000>
10. Nesterenko, M.M., Orysenko, O.V., Sidan, D.O., & Shokalo, A.V. (2022). Laboratornyi budivelni 3D prynter [Laboratory construction 3D printer]. In: *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Automation, Computer-Integrated Technologies and Energy Efficiency Problems in Industry and Agriculture (AKIT-2022)”* (pp. 223–224). Kropyvnytskyi: Ekskliuziv-System.
11. Orysenko, O., Nesterenko, M., & Shokalo, A. (2022). The analytical investigation of the concrete mixture deposition process by the concrete 3D printer extruder. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(59), 5–10. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.3093>
12. Orysenko, O.V., Nesterenko, M., Shokalo, A., & Nesterenko, T. (2021). Design of 3D printers analysis for construction and architecture. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 105–110.