

УДК 678.027.3

ПОЛІЩУК А. О.

Хмельницький національний університет, Україна

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ КОРПУСУ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА

Мета. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера, яка спрямована на зменшення перегріву полімерного матеріалу під час екструзії та підвищення точності і якості друку готових деталей.

Методика. У роботі для реалізації висунутих завдань і перевірки сформульованих гіпотез було використано комплекс методів: теоретичний, емпіричний та статистичний. Теоретичні та експериментальні дослідження базувалися на фундаментальних знаннях в області галузевого машинобудування, теплотехніки, а також враховувалися особливості та вимоги, пов'язані з переробкою полімерів. Математичне опрацювання результатів дослідження здійснювалося за допомогою програмного забезпечення MS Excel.

Результати. Розроблено систему охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера з використанням матеріального циліндра з ребрами для тепловідведення, двома вентиляторами та тепловим бар'єром. Виготовлено термоізолюючі прокладки (бар'єри) для екструдера 3D-принтера з силікону, тефлону (фторопласту 4) та флубону. Досліджено їх теплопровідність. З використанням SolidWorks Simulation виконано статичний та перехідний термічні аналізи системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера. Розроблено вимірювальну систему для встановлення температури шнекового екструдера в п'яти точках. Проведено експериментальні дослідження по визначенню температури в різних місцях шнекового екструдера: на соплі; на нагрівальному елементі; на охолоджуючих ребрах матеріального циліндра; під теплоізоляційною прокладкою; всередині завантажувального бункера та на його корпусі. Побудовано графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера при використанні різних елементів охолоджуючої системи. Здійснено порівняння температур шнекового екструдера, визначених теоретично з використанням SolidWorks Simulation та експериментально з використанням вимірювальної системи та тепловізійної камери.

Наукова новизна. Встановлено раціональні співвідношення між елементами системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера, які дозволяють запобігти перегріву екструдера та підвищити якість процесу екструзії та виготовлення готових виробів.

Практична значимість. Розроблено систему охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера, яка дозволить значно підвищити ефективність та надійність процесу 3D-друку. Така система також сприятиме збільшенню довговічності обладнання, зниженню виробничих витрат шляхом попередження дефектів у виробі 3D-друку, пов'язаних з температурними коливаннями, та покращенню їх якості. Крім того, ефективне охолодження дасть змогу використовувати більш широкий спектр полімерних матеріалів, включаючи ті, що мають вищі вимоги до температурного режиму, тим самим розширюючи можливості 3D-друку та забезпечуючи більшу гнучкість у виробництві.

Ключові слова: 3D-принтер; 3D-друк; шнековий екструдер; система охолодження; теплобар'єр; термоізолююча прокладка; SolidWorks Simulation; датчик температури; тепловізійна камера.

Вступ. При екструзії полімерних матеріалів важливим питанням є перегрів шнекового екструдера, який може негативно вплинути на якість друку та довговічність обладнання. Це питання можна вирішити шляхом розробки та впровадження ефективної системи охолодження, яка може включати вентиляційні системи, радіатори чи рішення на базі рідинного охолодження. Така система дозволить активно контролювати температуру екструдера, забезпечуючи оптимальні умови для плавлення полімеру, знижуючи ризик перегріву та забезпечуючи більшу однорідність і точність виробів. Крім того, використання

передових матеріалів з високою теплопровідністю для конструкції екструдера може допомогти в розсіюванні надлишкового тепла, забезпечуючи додаткову безпеку та ефективність процесу.

Під час роботи корпус екструдера 3D-принтера нагрівається до певної температури. Тепло утворюється за рахунок роботи електронагрівача, який знаходиться в алюмінієвому нагрівальному блоці. Він розміщений в нижній частині матеріального циліндра. Оскільки алюміній є дуже хорошим провідником з теплопровідністю $209,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ [1], а циліндр/охолоджувач екструдера виготовлено з однієї суцільної металевої заготовки зі сталей 40 або 40X з теплопровідністю $74,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ [1, 2], то тепло дуже швидко передається з нижньої частини у верхню. Воно також виникає через внутрішні сили тертя, створені рухом шнека всередині циліндричної оболонки. Під час обертання шнека його лопаті переміщують гранульований полімер вздовж ствола, при цьому матеріал третється об корпус циліндра та шнека, що призводить до виділення тепла. Перевищення температури нагрівання корпусу може негативно вплинути на процес екструзії полімеру та виготовлення готового виробу. Гранули полімерів можуть розплавитися під впливом тепла, яке виділяється від екструдера під час роботи. Охолодження корпусу перед завантаженням допомагає уникнути небажаного розплавлення гранул перед тим, як вони навіть потраплять в екструдер. Під час завантаження гранул до екструдера можуть виникнути великі температурні градієнти. Охолодження корпусу допомагає зберегти стабільність температури та забезпечує ефективну роботу екструдера під час завантаження. Висока температура може вплинути на деякі частини екструдера, зокрема на ті, що виготовлені із полімерного матеріалу. Це, в свою чергу, може призвести до їхньої деформації або пошкодження. Охолодження допомагає зберегти ці елементи в нормальному стані. Завантаження гранул у високотемпературний екструдер може бути небезпечним і призвести до опіків або травм. Зменшення температури корпусу під час завантаження сприяє безпечнішому виконанню цієї операції. З урахуванням цих факторів охолодження корпусу екструдера перед завантаженням гранул стає важливим аспектом для забезпечення безпечного та ефективного процесу друку на 3D принтерах.

Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера має велике практичне значення, оскільки вона сприяє підвищенню надійності та продуктивності процесу 3D-друку за рахунок запобігання перегріву екструдера. Така система дозволяє використовувати ширший спектр полімерних матеріалів, включаючи ті, які вимагають низьких температур обробки, тим самим забезпечуючи енергоефективність та екологічність процесу. Крім того, вона знижує ризик травм та пошкодження обладнання, вносячи важливий вклад у інноваційний розвиток технології 3D-друку і роблячи виробничий процес більш гнучким та масштабованим.

Постановка завдання. Розробити систему охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера та забезпечити її сумісність з існуючими конструкціями 3D-принтерів.

Результати дослідження. Хотенд (англ. hotend) у контексті 3D-друку – це ключова частина екструдера, яка відповідає за нагрівання та розплавлення монопісти до необхідної температури для подальшого її екструдювання через сопло. Хотенд є критичною складовою для будь-якого 3D-принтера, що працює за технологією Fused Deposition Modeling (FDM) [3, 4].

У шнековому екструдері для 3D-принтера, який використовує гранули або подрібнені частки полімеру, еквівалентом хотенду є зона плавлення полімеру. Таким чином, у шнековому екструдері зона плавлення полімеру виконує функції хотенда, забезпечуючи нагрівання, плавлення, гомогенізацію та подачу розплавленого полімеру до сопла для 3D-друку.

Контроль температури хотенда (зони плавлення) необхідний для підтримки якості друку. Сильна флуктуація може спричинити блокування гарячого кінця, отже, розриви в потоці матеріалу, що впливає на якість виготовлених деталей [5]. Також важливо зменшити втрати тепла від гарячого блоку до верхньої частини екструдера та уникнути деформацій при підвищених температурах у пластикових деталях, які використовуються в екструзійному блоці.

Аналіз наукових праць показав, що більшість робіт в цьому напрямку стосуються хотенда. Роботи по дослідженню нагрівання шнекового екструдера практично відсутні. Тому за основу досліджень можна розглянути наукові праці, що стосуються теплової поведінки хотенда та оптимізації його конструкції. Роботи [6, 7] присвячені розробці моделей кінцевого елементного аналізу для розуміння впливу геометричних параметрів хотенда на механічні змінні процесу друку, такі як перепад тиску розплавленого матеріалу, потоку матеріалу і товщини шару. Результати, надані цими авторами, вказують на високий зв'язок між геометрією сопла для друку та якістю друку. Крім того, вони відзначають, що основним компонентом, який визначає термічну поведінку екструдера, є теплоізолятор (теплоізолятор), присутній у деяких проаналізованих конструкціях 3D-принтерів. Саме питанню використанню теплоізолятора в хотенді присвячена робота [8]. Наявність теплоізолятора веде до зменшення теплопровідності матеріалу на вході в тепловий блок та призводить до кращого використання енергії за рахунок зменшення розсіювання тепла.

В роботі [9] використовується метод скінчених елементів для перевірки теплових характеристик екструдера 3D-принтера з відкритим кодом. В науковій праці [10] досліджується вплив потоку, що створюється вентилятором, з'єднаним з екструдером на механізми теплопередачі під час процесу друку. В роботі [11] проводяться дослідження по впливу геометрії радіатора на продуктивність охолодження, а в праці [12] здійснюється аналіз впливу геометрії сопла примусової вентиляції на розподіл тепла в хотенді.

В першій моделі розробленого екструдера 3D-принтера, що друкує гранулами або подрібненими відходами полімерів охолодження корпусу відбувалося за рахунок розміщених на матеріальному циліндрі ребер для охолодження. Охолоджуючі ребра знаходяться на матеріальному циліндрі у верхній частині екструдера. Розроблена модель матеріального циліндра з ребрами повітряного охолодження в програмному середовищі SolidWorks наведена на рис. 1, а його загальний вигляд – на рис. 2 [13].

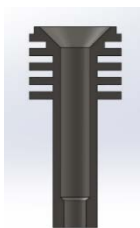


Рис. 1. Модель SolidWorks матеріального циліндра з ребрами повітряного охолодження

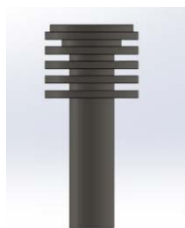


Рис. 2. Загальний вигляд матеріального циліндра з ребрами повітряного охолодження

Основне їх призначення – це збільшення площі поверхні циліндра у місці надходження полімерного матеріалу у шнек. Таким чином збільшувалася площа тепловіддачі та підвищувалася ефективність охолодження. Таке розташування повинно було запобігти потраплянню тепла в бункер і частковому плавленню гранул полімеру, які не потрапили в порожнину між матеріальним циліндром та шнеком. В результаті при роботі з пластиками TPU, PLA, ABS відбувалося злипання матеріалу і блокування його транспортування в зону

пластифікації екструдера [14]. В один момент певні пластикові деталі бункера почали плавитися через велику кількість тепла, що утворилося навколо ребер. Регулювання температурного режиму нагрівача позитивних результатів не принесло.

Таким чином використання металевих ребер було недостатньо ефективним.

В подальшому для поліпшення їхньої тепловіддачі було запропоновано використати потік повітря від вентилятора. Він спрямовує повітря на нагріту деталь обладнання, допомагаючи відводити тепло в навколишнє середовище.

Охолодження екструдера за допомогою потоку повітря від вентилятора є досить ефективним методом і має декілька переваг: розсіювання тепла; зменшення перегріву полімерного матеріалу та збереження його якості, а саме фізичних та хімічних властивостей; забезпечення продуктивності за рахунок стабільної роботи екструдера; можливість керування температурою. За допомогою вентилятора можна регулювати температуру в окремих зонах екструдера, що дозволяє досягти більш точного керування процесом екструзії.

Отже, використання потоку повітря від вентилятора для охолодження екструдера є важливим і ефективним способом забезпечення оптимальних умов роботи обладнання та підвищення якості продукції.

Вентилятор турбінного типу 1 потужністю 1,2 Вт та габаритними розмірами 50x50 мм для обдування ребер було розміщено у верхній частині корпусу екструдера (рис. 3). Для направлення потоку повітря для обдуву ребер циліндра, з використанням програмного середовища SolidWorks було спроектовано направляюче сопло 2 [13].



1 – турбінний
вентилятор
2 – направляюче
сопло

Рис. 3. Екструдер з повітряним охолодженням за допомогою вентилятора

При друку гранулами ABS пластику в деяких випадках відбувалося їх злипання. Це призвело до зниження продуктивності екструдера та стабільної його роботи.

Наступні вдосконалення системи охолодження перегрітої частини корпусу екструдера полягали у встановленні додаткового вентилятора, який би спрямовував потік повітря у завантажувальний бункер та додавання теплового бар'єру.

Встановлення теплового бар'єру між нагрітим корпусом екструдера та бункером може мати кілька переваг і бути цілком обґрунтованим:

- зменшення теплопередачі. Тепловий бар'єр на основі теплоізоляційного матеріалу або ізольованої стінки, може допомогти знизити передачу тепла від нагрітого корпусу екструдера до бункера. Це дозволить підтримувати більш стабільну температуру в бункері і запобігатиме надлишковому нагріванню матеріалу;

- зниження енерговитрат. Зменшення теплопередачі може призвести до зниження витрат енергії на підтримку температури в матеріальному циліндрі. Це може бути важливим з точки зору енергоефективності та економії ресурсів;

- збереження якості матеріалу. Передача зайвого тепла в бункер може вплинути на якість матеріалу, особливо якщо це пластичний полімер. За допомогою теплового бар'єру можна забезпечити більш стабільні умови транспортування полімерного матеріалу в зону пластифікації матеріального циліндра та подальшого його дозування в розплавленому вигляді;

- запобігання можливим пошкодженням. Надлишкове нагрівання бункера може вплинути на його цілісність та тривалість служби. Встановлення теплового бар'єру може допомогти запобігти можливим пошкодженням корпусу бункера.

Отже, встановлення теплового бар'єру між нагрітим корпусом екструдера та бункером є обґрунтованим, оскільки воно сприяє зниженню теплопередачі, збереженню якості матеріалу та енергоефективності процесу.

Додавання теплового бар'єру повністю відокремлює бункер від зони розплаву матеріального циліндра. В якості бар'єру було вибрано три матеріали: силікон, тефлон та флубон.

Силікон (силіконова гума) – це еластичний полімерний матеріал, який виготовляється на основі високомолекулярних сполук кремнію з органічними речовинами [15]. Він володіє рядом унікальних властивостей, які роблять його популярним і використовується в різних галузях промисловості і виробництва. Основні властивості силікону включають [15, 16]:

- термостійкість. Силікон володіє високою термостійкістю до 280 °С, а короткочасно і 300°С [15]. Він може переносити високі температури без втрати структури або властивостей. Це робить його ідеальним для використання в умовах високих температур, що є актуальним для його використання в екструдері 3D-принтера в якості теплового бар'єру;

- гнучкість і еластичність. Силікон є гнучким і еластичним матеріалом, який може зберігати свою м'якість і пружність при різних температурах. Це дозволяє використовувати його в таких застосуваннях, де потрібна гумова герметизація або амортизація ударів. Це, в свою чергу, може гасити вібраційні процеси, які можуть виникати при переміщенні екструдера при 3D-друку;

- водовідштовхувальність. Силікон є водонепроникним матеріалом, і він володіє високою стійкістю до вологи та рідин. Це може бути актуальним питанням при 3D-друку різноманітними пастами та сумішами [17–19];

- стійкість до ультрафіолетового випромінювання. Силікон не втрачає своїх властивостей під впливом ультрафіолетового випромінювання, що робить його відмінним для використання в екструдері 3D-принтера, на який можливе попадання сонячних променів;

- безпечність для здоров'я. Силікон вважається безпечним для здоров'я і не містить шкідливих речовин, що можуть виділятися при підвищених температурах;

- хімічна стійкість. Матеріал володіє хімічною стійкістю і не взаємодіє з багатьма речовинами, включаючи кислоти і луги, що може бути актуальним при 3D-друку композиційними сумішами.

Політетрафторетилен (PTFE), також відомий як тефлон, є важливим полімерним матеріалом з численними унікальними властивостями [20, 21]. Розглянемо деякі його основні характеристики [21–23]:

- низька схильність до прилипання. Тефлон має дуже низьку енергію поверхні, що робить його неклеєким. Він також має високий коефіцієнт ковзання. Ця властивість робить PTFE ідеальним матеріалом для використання в бункері екструдера;

- висока термічна стійкість. Матеріал витримує дуже високі температури, без розкладання. Він може витримувати температури вище 300 °С без зміни своїх хімічних властивостей [23];

- низька теплопровідність. Ця особливість робить його важливим матеріалом для багатьох застосувань, де потрібна термоізоляція при високих температурах. Теплопровідність фторопласту дуже низька. Вона зазвичай знаходиться на рівні природних матеріалів, таких як дерево чи бамбук та складає $0,252 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ [23]. У випадку застосування в екструдері 3D-принтера даний матеріал буде відмінним термоізолятором від тепла та стійким до високих температур;

- мінімальне теплове розширення. Тефлон має дуже низький коефіцієнт теплового розширення, що означає, що він не розширюється або звужується при зміні температури. Температурний коефіцієнт лінійного розширення для нього складає $1\cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}^{-1}$ [21]. Це важливо для деяких застосувань, де точність розмірів є критичною. При його використанні в екструдері 3D-принтера, який є малогабаритним, питання точності розмірів є актуальним;

- висока міцність. Незважаючи на те, що PTFE має низьку міцність в порівнянні з деякими іншими полімерами, він все одно досить міцний і має високу стійкість до зношування. Межа міцності на розрив для нього складає $14,0 \text{ МПа}$ [23]. При використанні в екструдері у якості ізолюючої прокладки він не буде піддаватися великим динамічним навантаженням. Тому його в даному випадку можна використовувати;

- відмінна хімічна стійкість. PTFE стійкий до багатьох хімічних речовин, включаючи кислоти, луги і багато розчинників [20]. Ця хімічна стійкість робить його важливим матеріалом для обладнання, яке контактує з агресивними речовинами. Це є актуальним питанням при 3D-друку композиційними сумішами [24].

Завдяки своїм унікальним властивостям PTFE широко використовується в різних галузях, включаючи хімічну промисловість, автомобільну промисловість, електроніку тощо [21, 23].

Антифрикційний матеріал флубон – полімерний композиційний матеріал на основі політетрафторетилену, сополімерів етилену і тетрафторетилену і інших фтормістких полімерів, модифікованих вуглецевих волокон і інших волокнистих і дисперсних наповнювачів.

Вуглефторопласт (CFFC), який часто називається флубоном – це високополімерний композиційний матеріал із групи фторованих полімерів. Літерна аббревіатура CFFC розшифровується з англ. carbon fiber fluon composition – вуглеволокниста фторопластова композиція [25]. Вони складаються з фторопласту, наповненого вуглецевими волокнами в певному відсотковому відношенню.

Лабораторія полімерних композиційних і мастильних матеріалів Хмельницького національного університету єдина в Україні, яка займається створенням та виготовленням різних марок композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену, сополімерів етилену і тетрафторетилену та інших полімерів, що вміщують фтор та модифікованих вуглецевих волокон і інших дисперсних і волокнистих наповнювачів. Лабораторією випускається флубон двокомпонентним і багатокомпонентним. Науковцями створено декілька марок матеріалу: 15, 20, 15MB, 15/20, K15UB5, ДМ, ДМГ-С1, ДМ-Б [26].

На даний час існує мало технічної літератури, яка б описувала властивості флубону, але аналіз існуючої дав змогу визначити декілька його характеристик:

- відмінна хімічна стійкість. Вуглефторопласти володіють високою стійкістю до хімічних агентів, включаючи корозію від кислот, лугів, розчинників та інших агресивних речовин. Ця характеристика робить їх ідеальними для використання в агресивних середовищах;

- висока термічна стійкість. Вуглефторопласти здатні витримувати високі температури без деформації чи розплавлення;

- низька теплопровідність. Теплопровідність флубону знаходиться в межах теплопровідності фторопласту;

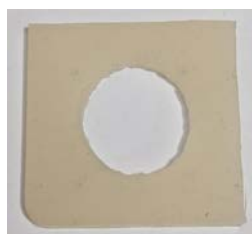
- мінімальне теплове розширення. Додавання вуглецевих волокон в фторопласт дозволило зменшити теплове розширення композиційного матеріалу;
- висока міцність. Введення в склад композиційного матеріалу вуглецевих волокон дозволяє покращити міцність. Вуглеволокниста фторопластова композиція має кращий показник міцності на розривання;
- низький коефіцієнт тертя. Вони мають низький коефіцієнт тертя, що робить їх добрими змащувальними матеріалами;
- високі антифрикційні властивості. При введенні вуглецевих волокон антифрикційні властивості фторопласту підвищуються в 2000 разів.
- водонепроникність. Флубони не вбирають воду і мають дуже низький коефіцієнт водопоглинання.

Ці властивості роблять вуглефторопласти, включаючи флубон, популярними матеріалами в різних галузях, таких як хімічна промисловість, електротехніка, галузеве машинобудування, медицина та інші.

Загалом, технічні характеристики фторопласту 4 і флубону подібні. Обидва матеріали є високоякісними полімерами з відмінними властивостями, які використовуються в різних галузях промисловості і науки та можуть бути використанні в якості теплового бар'єру в екструдері 3D-принтера.

З метою проведення експериментальних досліджень було виготовлено термоізолюючі прокладки (бар'єри) для екструдера 3D-принтера товщиною 2 мм та габаритними розмірами 37х37 мм. Така товщина обумовлена габаритними розмірами екструдера змодельованого в програмному середовищі SolidWorks [13].

Прокладку із силікону було виготовленої із силіконової пластини товщиною 20 мм (рис. 4,а). Термобар'єр з фторопласту 4 було виготовленої з фторопластової пластини товщиною 20 мм (рис. 4,б). Вуглефторопластову прокладку для шнекового екструдера було виготовлено з флубону 15 в лабораторії полімерних композиційних і мастильних матеріалів Хмельницького національного університету (рис. 4,в).



а) силіконова гума



б) фторопласт 4



в) флубон 15

Рис. 4. Термоізолюючі прокладки

З метою визначення того, який із зазначених матеріалів (рис. 4) має найменшу теплопровідність було проведено експериментальні дослідження. Їх суть полягала в наступному. Теплоізоляційні матеріали встановлювалися на робочу платформу 3D-принтера Anycubic 4 Max Pro 2.0 [27]. Було вибрано саме цю модель принтера у зв'язку з тим, що він має закритий корпус. Наявність закритого корпусу дає змогу стабілізувати температуру всередині та проводити експериментальні дослідження при сталому режимі нагрівання.

За допомогою налаштувань пристрою було встановлено температуру нагріву 50 °С. Теплоізоляційні прокладки розміщувалися на платформі принтера (рис. 5).

Після стабілізації температури їх нагріву було проведено вимірювання температури робочого столу та зовнішніх поверхонь кожної із них. Візуальне зображення нагрівання

прокладок було знято за допомогою тепловізійної камери Walcom HT-03 [28]. Результати вимірювання представлено на рис.6.

Аналізуючи отримані знімки можна побачити, що температура нагрівального столу в місцях вимірювання коливалася від $51,4^{\circ}\text{C}$ до $51,9^{\circ}\text{C}$. Температура зовнішніх поверхонь теплоізолюючих прокладок становила: силікон $47,9^{\circ}\text{C}$; фторопласт $47,1^{\circ}\text{C}$; флубон $43,8^{\circ}\text{C}$. Визначивши різницю температур було встановлено кількість тепла, що затримується у теплобар'єрі: з флубону $7,8^{\circ}\text{C}$; з фторопласту $4,3^{\circ}\text{C}$, з силікону $4,3^{\circ}\text{C}$.



Рис. 5. Розміщення теплоізоляційних прокладок на платформі 3D-принтера

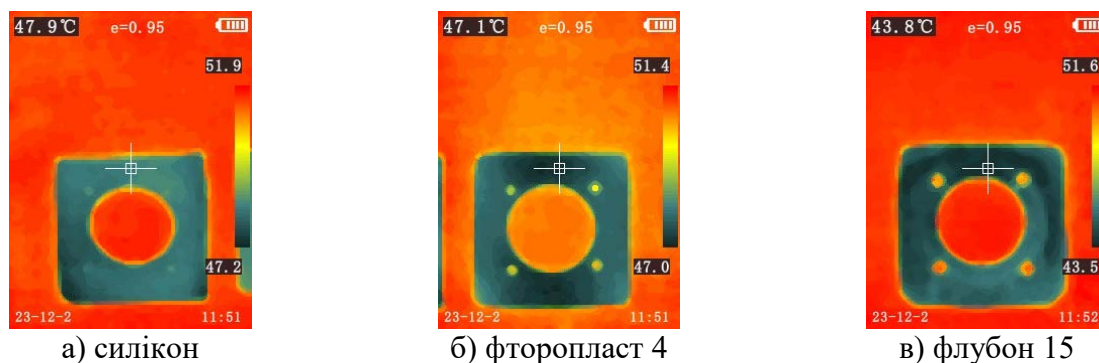


Рис. 6. Візуальне зображення нагрівання прокладок

Виходячи з цього можна зробити висновок про те, що коефіцієнт теплопровідності флубону найменший, хоча в технічній літературі наводиться інформація, що у фторопласта 4 коефіцієнт теплопровідності ($0,252 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) [23] менший порівняно з флубоном 15 ($0,34...0,37 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) [26]. Встановлення кількісних показників коефіцієнта теплопровідності матеріалів не є предметом даної роботи. Ефективність термобар'єрів із зазначених матеріалів було перевірено на реальному об'єкті – шнековому екструдері.

Загальний вигляд екструдера зі встановленим додатковим вентилятором потужністю 40 Вт і габаритними розмірами $40\times 40 \text{ мм}$ приведено на рис. 7, а із термоізолюючою прокладкою на рис. 8.

Для виконання статичних та перехідних термічних аналізів системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера було використано програмне середовище SolidWorks, а саме додаток SolidWorks Simulation. SolidWorks Simulation – це потужний інструмент для проведення комплексного аналізу напружень, деформацій, втоми матеріалів, а також термічного аналізу в рамках CAD-середовища SolidWorks [29].

Такий підхід дозволяє детально вивчити термічні властивості та поведінку кожного варіанту конструкції шнекового екструдера під час експлуатації, забезпечуючи важливу інформацію для його оптимізації.

Статичний термічний аналіз дозволяє зосередитися на оцінці стабільного стану теплопровідності екструдера. Він дає змогу визначити розподіл температури по всій конструкції при певних стабільних умовах, наприклад, коли екструдер працює з постійною температурою протягом тривалого часу.

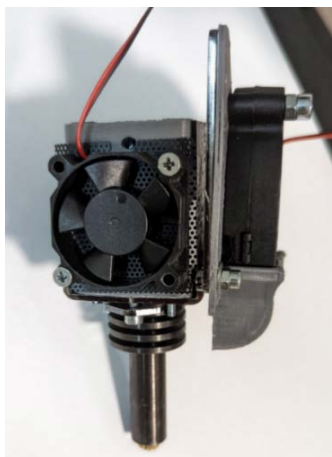


Рис. 7. Загальний вигляд екструдера зі встановленим додатковим вентилятором

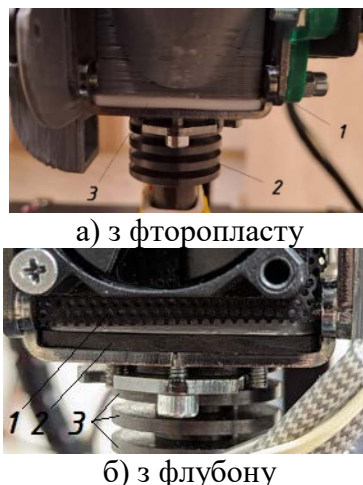
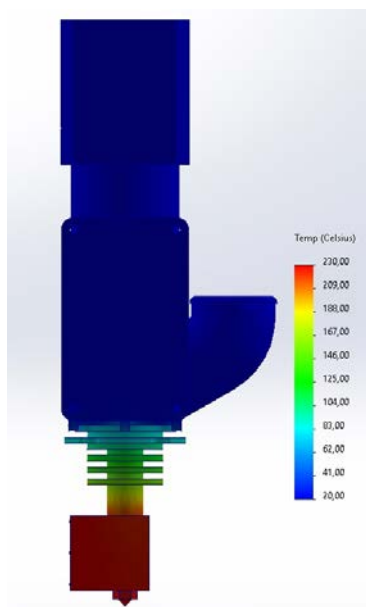


Рис. 8. Загальний вигляд екструдера зі встановленою термоізолюючою прокладкою

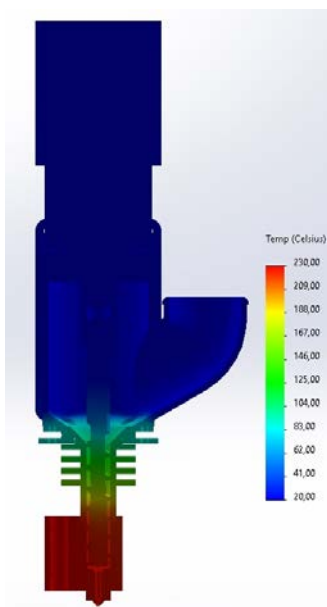
1 – завантажувальний бункер;
2 – охолоджуючі ребра;
3 – термоізолююча прокладка

Перехідний термічний аналіз дозволяє оцінити, як конструкція буде реагувати на зміни температури з часом. Це включає аналіз змін теплопровідності під час розігріву, охолодження та інших динамічних теплових процесів.

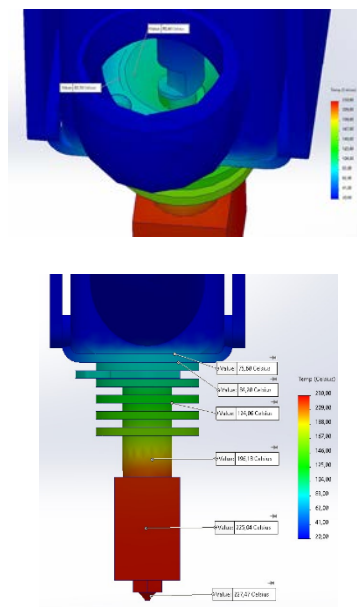
За допомогою SolidWorks Simulation було створено моделі охолодження шнекового екструдера з використанням матеріального циліндра з ребрами для розсіювання тепла (рис. 9); з повітряним охолодженням за допомогою вентилятора (рис. 10), з додатковим повітряним вентилятором та з використанням теплового бар'єру у вигляді прокладки з трьох різних матеріалів: силікон, фторопласт 4, флубон 15 та проведено їх аналіз (рис. 11–13).



а) суцільний



б) в розрізі



в) значення температури в точках вимірювання

Рис. 9. Зміна температури в шнековому екструдері при наявності ребер для розсіювання тепла на матеріальному циліндрі

Для подальшої теплоізоляції шнекового екструдера нагрівальний елемент було обгорнуто фум-стрічкою та каптоновим скотчем (рис. 14). Основний компонент матеріалу стрічки – фторопласт-4, який є найбільш щільним серед усіх типів фторопластів і є важкогорючим. Цей матеріал, як вже відмічалось вище, здатний витримувати високі температури [30].

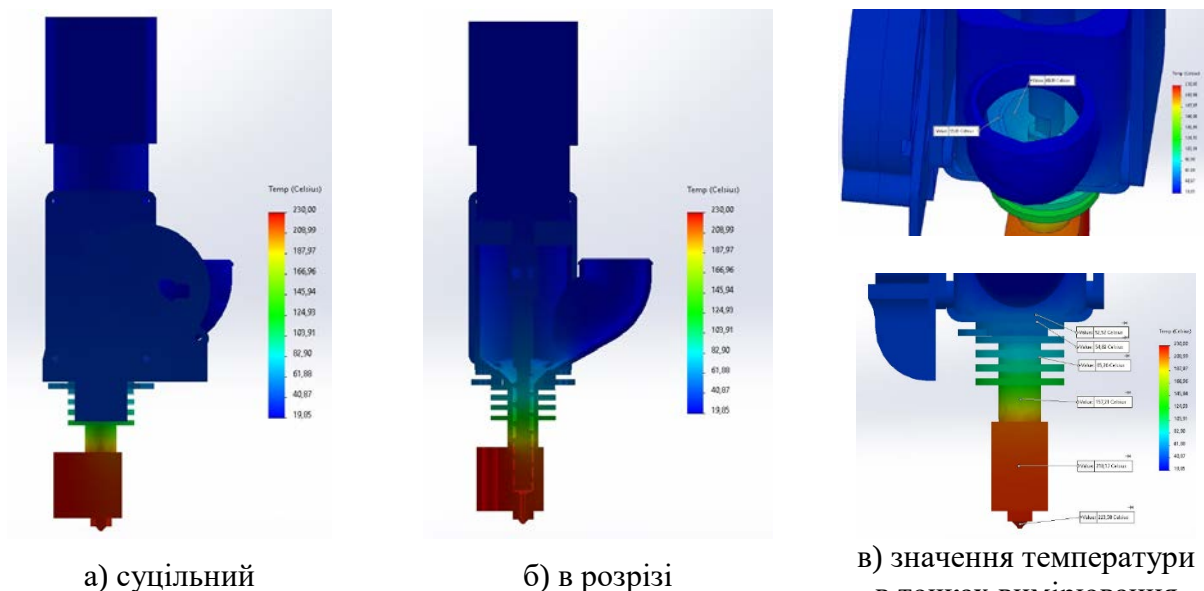


Рис. 10. Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою вентилятора

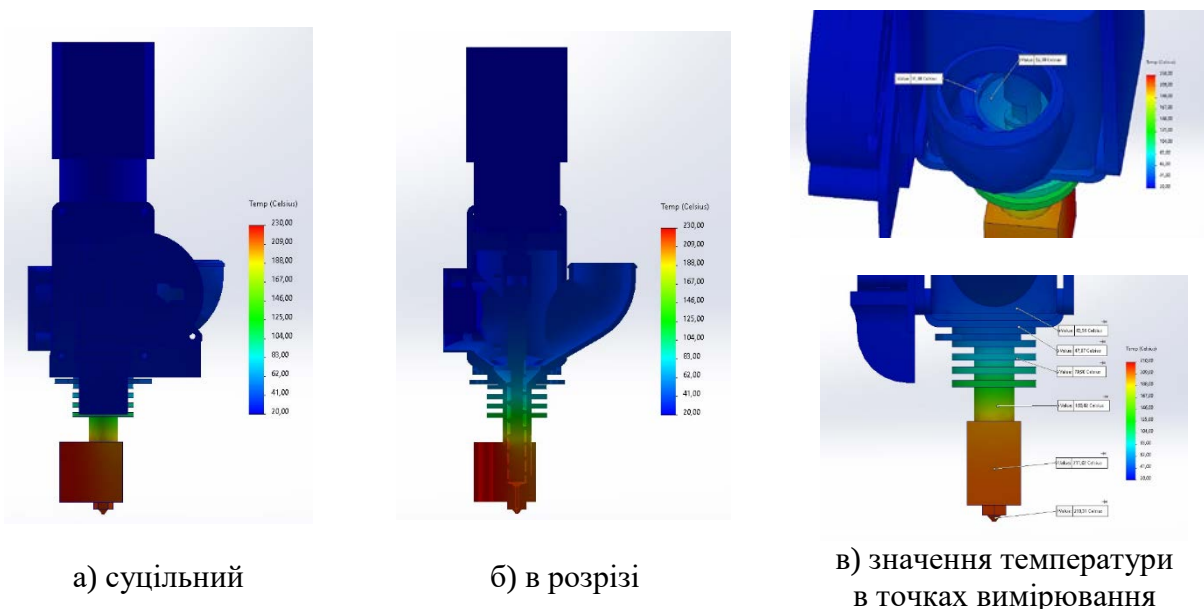


Рис. 11. Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою двох вентиляторів та теплового бар'єру у вигляді прокладки з силікону

Каптоновий скотч є матеріалом з високою термічною стійкістю, який широко використовується в 3D-принтерах в якості покриття для робочого столу та ізоляції нагрівального блоку та проводів нагрівального елементу хотенда [31].

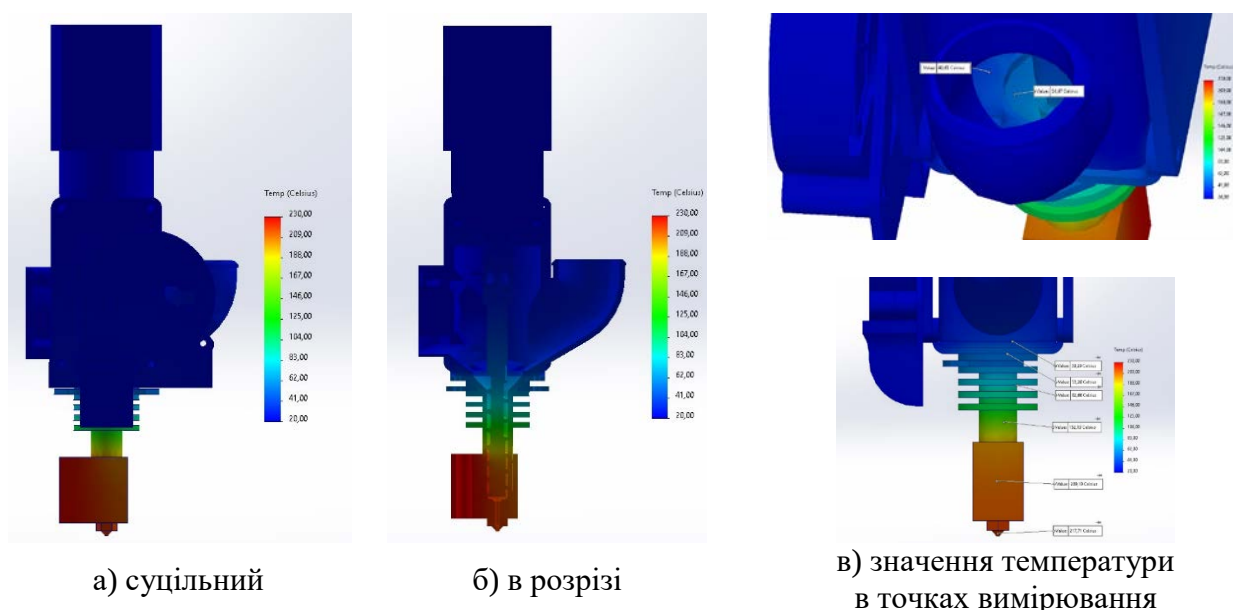


Рис. 12. Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою двох вентиляторів та теплового бар'єру у вигляді прокладки з фторопласту 4

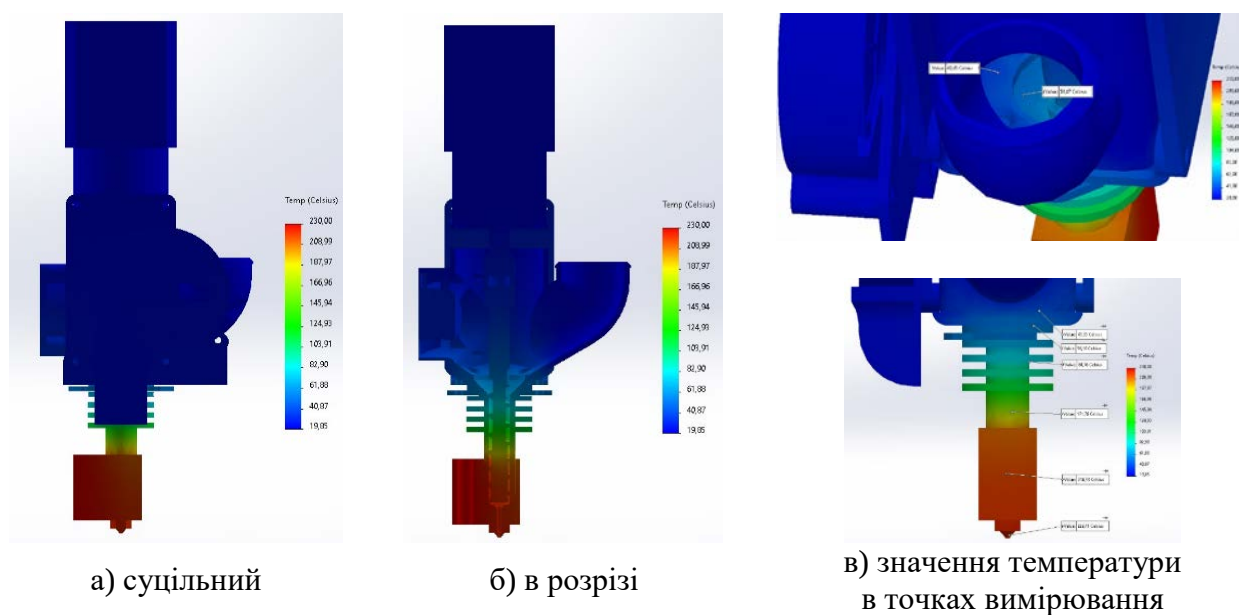


Рис. 13. Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою двох вентиляторів та теплового бар'єру у вигляді прокладки з флубону 15

Були проведені експерименти по визначенню температури шнекового екструдера. З цією метою було розміщено 5 датчиків температури в різних його точках, зокрема: на нагрівальному елементі; на охолоджуючому радіаторі; під прокладкою теплового бар'єру; всередині завантажувального бункера; на зовнішній стороні корпусу бункера вище термопрокладки (рис. 15).

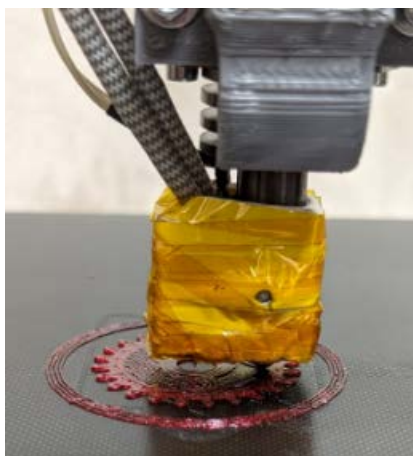


Рис. 14. Нагрівальний блок з тепловою ізоляцією

В якості датчиків було вибрано терморезистори NTC 3950 з опором 100 кОм [32]. Шнековий екструдер зі встановленими датчиками температури представлено на рис. 10.

Використовуючи мікроконтролер Arduino UNO R3 було зібрано вимірювальну систему для визначення температури шнекового екструдера [33]. Дана система представлена на рис. 16.



Рис. 15. Шнековий екструдер з під'єднаними терморезисторами

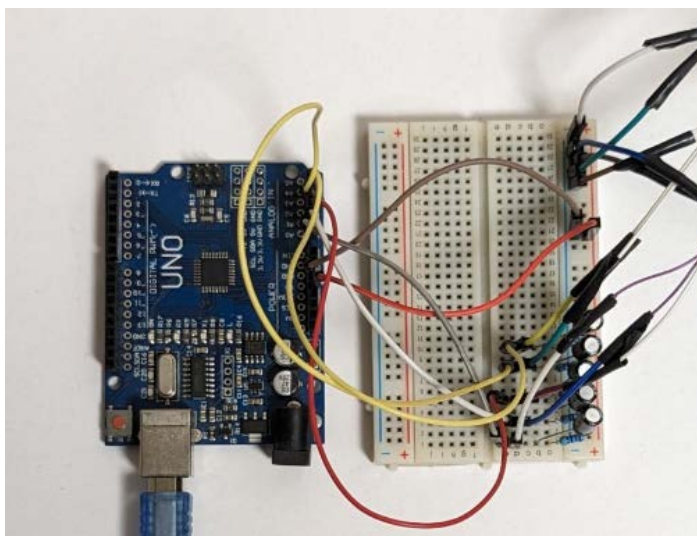


Рис. 16. Вимірювальна система для визначення температури з п'ятьма вимірювальними датчиками

Пристрій підключається до комп'ютера через USB, що дозволяє передавати дані для подальшого аналізу. Arduino Uno зчитує сигнали від датчиків температури та перетворює їх з аналогових в цифрові. Дані з Arduino передаються в комп'ютер через USB-порт і зберігаються у файлі для подальшого аналізу. Далі, використовуючи програмне середовище Microsoft Excel та отриманий файл, для візуалізації будуються графіки залежності температури від часу.

Реалізований підхід демонструє використання відкритих технологій та програмного забезпечення для створення корисних інструментів моніторингу в різних додатках, включаючи контроль температури у шнековому екструдері та при 3D-друку.

Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру з фторопласту і флубону наведено на рис. 17–18.

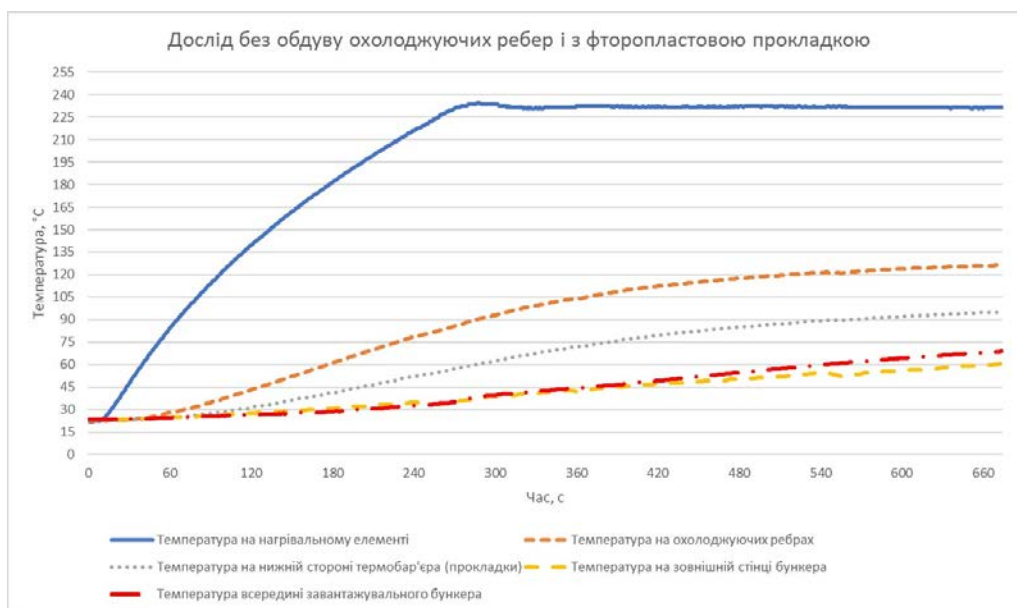


Рис. 17. Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової прокладки)

Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункері і наявністю термобар'єрів з фторопласту та флуобону приведено на рис. 19–20.

Візуальне зображення нагрівання, охолодження та екструзії було знято за допомогою тепловізійної камери Walcom HT-03 [28]. Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової та флуобонної прокладок), зроблені за допомогою тепловізора приведено на рис. 21 та 22.

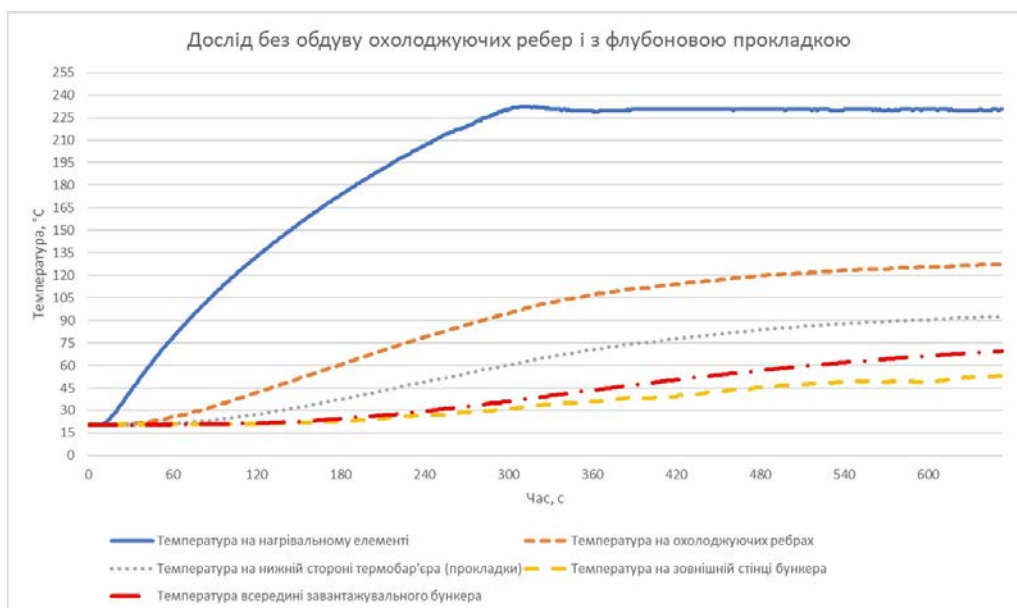


Рис. 18. Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (флуобонної прокладки)

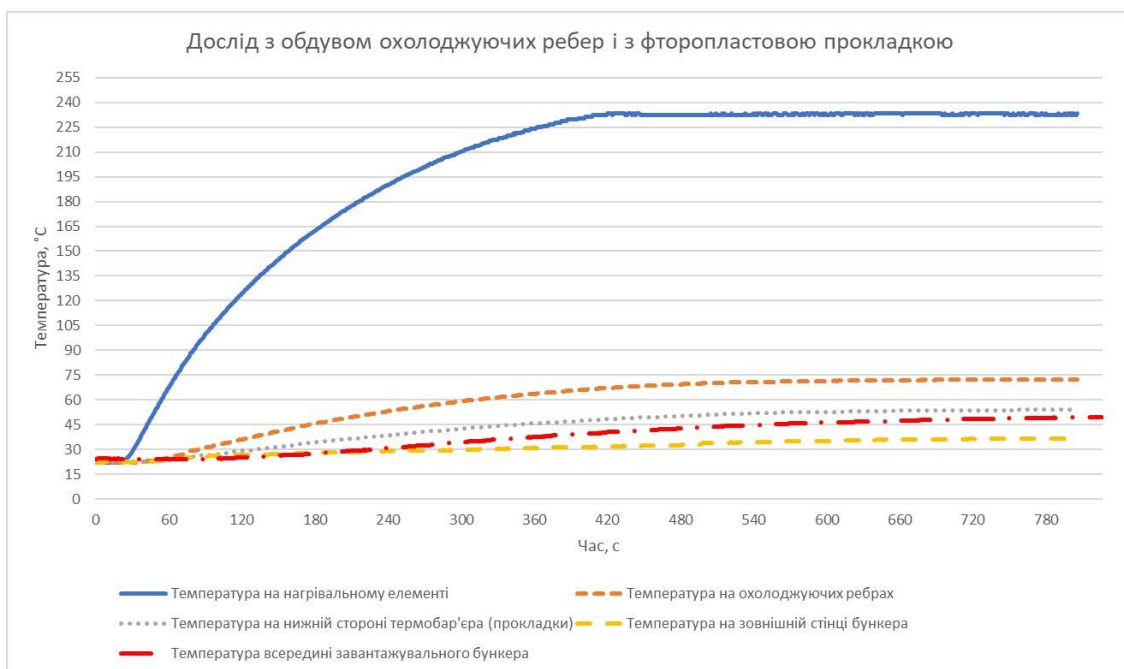


Рис. 19. Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та обдувом полімеру в завантажувальному бункері і наявності термобар'єру (фторопластової прокладки)

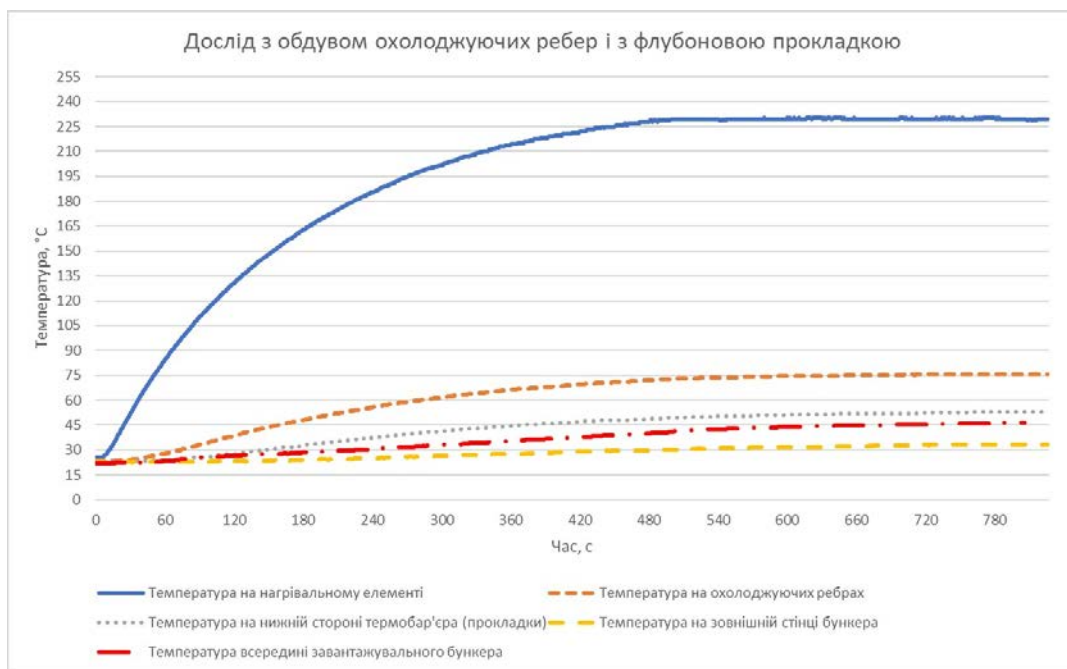
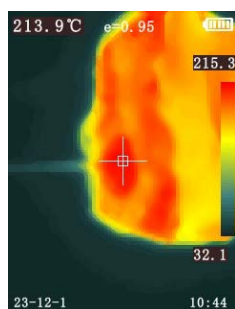
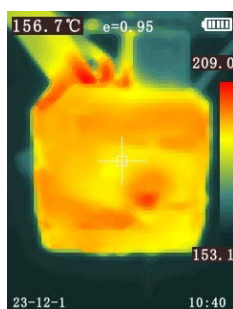


Рис. 20. Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та обдувом полімеру в завантажувальному бункері і наявності термобар'єру (флуоронової прокладки)

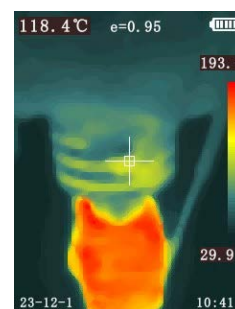
Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункера і наявності термобар'єру (фторопластової та флуоронової прокладок), зроблені за допомогою тепловізора приведено на рис. 23 та 24.



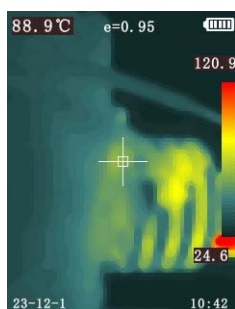
а) на соплі (точка 1)



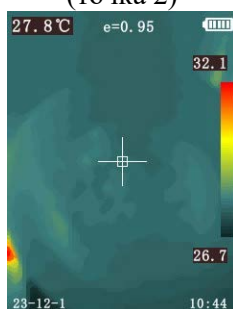
б) на нагрівальному елементі (точка 2)



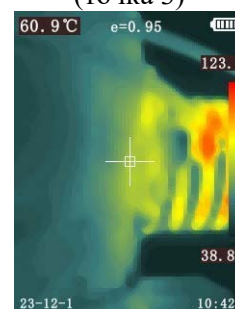
в) на охолоджуючих ребрах (точка 3)



г) на нижній стороні фторопласту прокладки (точка 4)

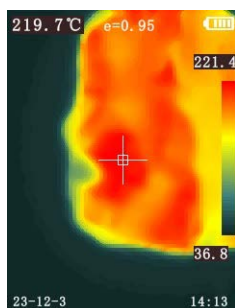


д) всередині завантажувального бункера (точка 5)

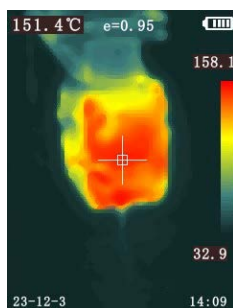


е) на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

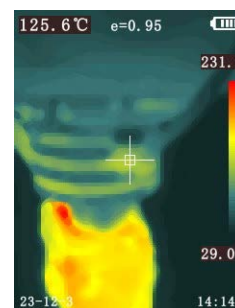
Рис. 21. Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру з фторопластової прокладки



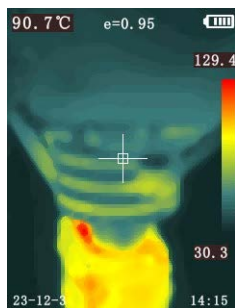
а) на соплі (точка 1)



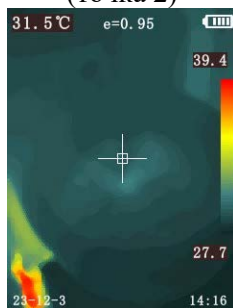
б) на нагрівальному елементі (точка 2)



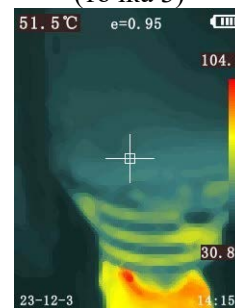
в) на охолоджуючих ребрах (точка 3)



г) на нижній стороні фторопласту прокладки (точка 4)

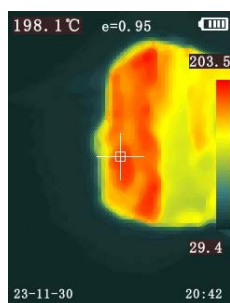


д) всередині завантажувального бункера (точка 5)

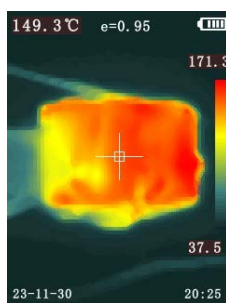


е) на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

Рис. 22. Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру з флуоронової прокладки



а) на соплі (точка 1)



б) на нагрівальному елементі
(точка 2)



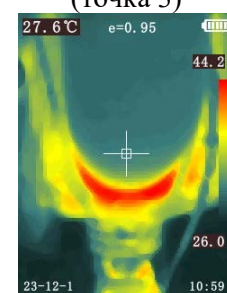
в) на охолоджуючих ребрах
(точка 3)



г) на нижній стороні
фторопласту прокладки
(точка 4)

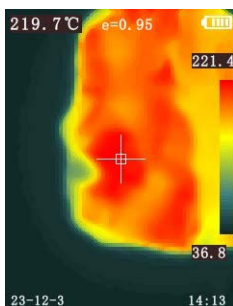


д) всередині завантажувального
бункера (точка 5)

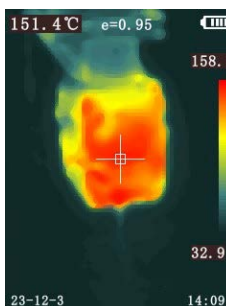


е) на зовнішній стінці бункера
вище термопрокладки (точка 6)

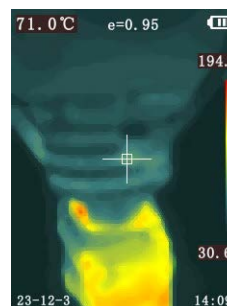
Рис. 23. Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункера і наявністю термобар'єру з фторопластової прокладки)



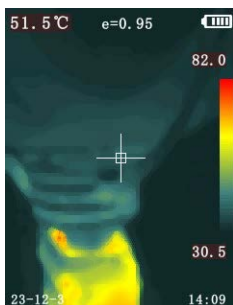
а) на соплі (точка 1)



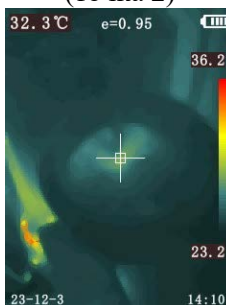
б) на нагрівальному елементі
(точка 2)



в) на охолоджуючих ребрах
(точка 3)



г) на нижній стороні
фторопласту прокладки
(точка 4)



д) всередині завантажувального
бункера (точка 5)



е) на зовнішній стінці бункера
вище термопрокладки (точка 6)

Рис. 24. Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункера і наявністю термобар'єру з флюбонової прокладки)

Значення температур в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової та флуоронової прокладок) приведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання без обдуву повітрям охолоджуючих ребер (прокладка фторопласт)

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, °C					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	227,47	235,4	124,06	84,7	83,58*	75,6*
2	За допомогою вимірювальної системи	-	232,5	124,3	92,0	68,0	60,0
3	З використанням тепловізійної камери	213,9	156,7**	118,4	88,9	27,8***	60,9

* значення температури розраховані без наявності теплового бар'єру (прокладки).

** значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елемента.

*** значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері.

Таблиця 2

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання без обдуву повітрям охолоджуючих ребер (прокладка флуобон)

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, °C					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	227,5	235,23	123,8	84,0	-	-
2	За допомогою вимірювальної системи	-	231	126,5	92	69	52
3	З використанням тепловізійної камери	219,7	151,4**	125,6	90,7	31,5***	51,5

** значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елемента.

*** значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері.

Похибка між теоретичними (рис. 9–13) та експериментальними (рис. 17–24) значеннями температур в різних місцях шнекового екструдера при використанні розробленої системи охолодження визначалася за формулою [34]:

$$\varepsilon = \frac{\pm(x_{\text{вим.}} - x_{\text{д}})}{x_{\text{д}}} \cdot 100\% = \frac{\pm\Delta_x}{x_{\text{д}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де $x_{\text{д}}$ – дійсне значення виміряної величини;

$x_{\text{вим.}}$ – виміряне значення величини;

Δ_x – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини.

Таблиця 3

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання з обдувом охолоджуючих ребер і полімеру в завантажувальному бункері та наявністю фторопластової прокладки

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, °C					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	217,71	209,19	82,06	53,2	40,65	38,29
2	За допомогою вимірювальної системи	-	232,5	73,5	53,1	48,1	35
3	З використанням тепловізійної камери	198,1	149,3**	70,6	51,5	32,8***	34,6

** значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елемента.

*** значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері.

Таблиця 4

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання з обдувом охолоджуючих ребер і полімеру в завантажувальному бункері та наявністю флюбонової прокладки

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, °C					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	222,41	216,33	84,76	56,16	40,86	40,05
2	За допомогою вимірювальної системи	-	230,5	75,1	52,5	45	33,2
3	З використанням тепловізійної камери	219,7	151,4**	71,0	51,5	32,3***	34,6

** значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елемента.

*** значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері.

За дійсне значення виміряної величини приймалися покази розробленої системи вимірювання на базі терморезисторів NTC 3950, які пройшли перевірку та мають похибку вимірювання в межах ± 1 °C.

Найбільша похибка при розрахунку за формулою (1) теоретичних та експериментальних значень температур в різних місцях шнекового екструдера (табл. 1, 2) без обдуву повітрям охолоджуючих ребер склала 27,5%. Таку велику похибку можна пояснити тим, що датчик температури не щільно прилягав до внутрішньої стінки завантажувального бункера. Це відобразилося на показах вимірювального приладу.

Найбільша похибка при розрахунку за формулою (1) теоретичних та експериментальних значень температур в різних місцях шнекового екструдера (табл. 1, 2) із використанням розробленої системи охолодження становила 9,6%, що знаходиться в межах допустимого. Це свідчить про високу точність та надійність вимірювань, що є критично важливим для забезпечення контролю якості процесу 3D-друку. Така висока точність дозволяє оптимізувати параметри нагрівання, забезпечуючи оптимальні умови для плавлення полімеру, та мінімізувати ризик дефектів в друкованих виробах. Результати також підкреслюють ефективність використання поєднання різних типів вимірювальних інструментів для отримання точних даних, які можуть бути використані для подальшого вдосконалення конструкції та процесів роботи екструдера.

Висновки. Проведені теоретичні дослідження розробленої системи охолодження шнекового екструдера, виконані за допомогою SolidWorks Simulation, дали змогу та підтвердили ефективність цього підходу. Моделювання в SolidWorks Simulation дозволило детально проаналізувати тепловий режим в різних частинах екструдера, виявляючи найбільш нагріті зони та оцінюючи ефективність різних елементів системи охолодження. Результати показали, що інтегрований підхід до охолодження забезпечує значне зниження температури в критичних зонах, запобігаючи перегріву та покращуючи загальну надійність та продуктивність екструдера. Таким чином, теоретичні дослідження підтвердили, що використання комплексної системи охолодження є ключовим для оптимізації роботи шнекового екструдера в 3D-друку.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили теоретичні розрахунки та показали, що найефективнішою системою охолодження шнекового екструдера є система з використанням охолоджуючих ребер на матеріальному циліндрі та їх обдуву потоком повітря від вентилятора, а також додаткового обдуву полімеру в завантажувальному бункері потоком повітря від вентилятора та наявності теплового бар'єру у вигляді прокладки з флубону між матеріальним циліндром та бункером. Це забезпечує більш ефективне відведення тепла від критичних елементів екструдера, знижуючи ризик перегріву та забезпечуючи стабільніші умови для процесу екструзії. Така інтегрована система охолодження показує значно кращі результати порівняно з окремим використанням охолоджуючих ребер або лише їх обдуву вентилятором, вказуючи на важливість комплексного підходу до управління температурою в обладнанні для 3D-друку.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що серед трьох матеріалів силікон, фторопласт 4 і флубон 15 найнижчу теплопровідність має флубон 15. Тому його можна рекомендувати для виготовлення теплового бар'єру у вигляді прокладки між матеріальним циліндром і завантажувальним бункером шнекового екструдера.

В цілому, дана розробка є значним досягненням, що сприяє розвитку адитивних технологій та удосконаленню шнекового екструдера 3D-принтера, забезпечуючи високу ефективність, економічність та екологічну сталість при 3D-друку.

References

1. Teploprovodnist metaliv: kharakterystyky, metody vyvchennia [Thermal conductivity of metals: characteristics, methods of study]. URL: https://interexpo.com.ua/rus/articles/cat_505-ff_0-items_2000-mode_full.html [in Ukrainian].
2. Mikulonok, I. O., Sokolskyi, O. L., Sivetskyi, V. I., Radchenko, L. B. (2015). Osnovy proektuvannia odnocherv'yachnykh ekstruderiv: navch. posib. [Basics of designing single-worm extruders: training. manual]. Kyiv: NTUU "KPI". 200 p. [in Ukrainian].
3. Sizov, V. D., Sorokvashin, S. V. (2018). Osnovy 3D-druku [Basics of 3D printing]. URL: https://cpto.dp.ua/public_html/posibnyky/osnovy_3d.pdf [in Ukrainian].
4. Manzhilevskyi, O. D., Iskovich-Lototskyi, R. D. (2021). Suchasni adytyvni tekhnolohii 3D druku. Osoblyvosti praktychnoho zastosuvannia [Modern additive technologies of 3D printing. Features of practical application: study guide]. Vinnytsia: VNTU, 2021. 105 p. [in Ukrainian].
5. Turner, B. N., Strong, R., Gold, S. A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I.

Література

1. Теплопроводність металів: характеристики, методи вивчення. URL: https://interexpo.com.ua/rus/articles/cat_505-ff_0-items_2000-mode_full.html.
2. Мікульонок І. О., Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Радченко Л. Б. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2015. 200 с.
3. Сізов В. Д., Сороквашин С. В. Основи 3D-друку. 2018. URL: https://cpto.dp.ua/public_html/posibnyky/osnovy_3d.pdf.
4. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2021. 105 с.
5. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing

Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), P. 192–204, <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>.

6. Sukindar, N. A., Ariffin, M. K. A., Baharudin, B. T. H. T., Jaafar, C. N. A., Ismail, M. I. S. (2016). Analyzing the Effect of Nozzle Diameter in Fused Deposition Modeling for Extruding Polylactic Acid Using Open Source 3D Printing. *Jurnal Teknologi*, 78(10), P. 7–15.

7. Papon, E. A., Sharif, M. A. R., Haque, A. (2017). Effect of Nozzle Geometry on Melt Flow Simulation and Structural Property of Thermoplastic Nanocomposites in Fused Deposition Modeling. Conference Paper. *Thirty-second Technical Conference*, West Lafayette, IN, USA, Oct. 23, 2017, <https://doi.org/10.12783/asc2017/15339>.

8. Gutiérrez Arias, G., Jiménez Díaz, F., Rúa Ramirez, E., Valcarcel Guzman, J. (2021). Thermal Analysis by Finite Elements of Hotends for 3D Printing by Fused Filament Fabrication. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 65(2), P. 129–133. <https://doi.org/10.3311/PPme.16203>.

9. Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J. A., Gomez-Gras, G., Freixedes, J. (2015). Design of Open Source 3D Printer Extruder and Modelling of Thermal Performance with FEA. *The 19th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"* (TMT), Barcelona, Spain, Jul. 22-23, 2015.

10. Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J. A., Corbella, X., Busqué, R., Gomez-Gras, G. (20116). Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier. *Mechatronics*, 36, P. 119–126.

11. Günel, O., Koc, E., Tiryaki, G. (2017). Investigation of Heat Sink Geometry Effect on Cooling Performance for a FDM 3D Printer Liquefier. *The International Conference on Energy and Thermal Engineering*, Istanbul, Turkey, 2017, pp. 569–573.

12. Günel, O., Koc, E., Yavuz, T. (2017). Investigation of Thermal Effect on 3D Printer Liquefier of different Cooling Fan Nozzle Geometry. *International Conference on Energy and Thermal Engineering*, Istanbul, Turkey, 2017, pp. 418–422.

13. Polishchuk, A. O. (2023). Rozrobka konstruktsii shnekovoho ekstrudera 3D-pryntera, shcho vykorystovuie

processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2014. 20(3). P. 192–204. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>.

6. Sukindar N. A., Ariffin M. K. A., Baharudin B. T. H. T., Jaafar C. N. A., Ismail M. I. S. Analyzing the Effect of Nozzle Diameter in Fused Deposition Modeling for Extruding Polylactic Acid Using Open Source 3D Printing. *Jurnal Teknologi*. 2016. 78(10). P. 7–15.

7. Papon E. A., Sharif M. A. R., Haque A. Effect of Nozzle Geometry on Melt Flow Simulation and Structural Property of Thermoplastic Nanocomposites in Fused Deposition Modeling. Conference Paper. *Thirty-second Technical Conference*. West Lafayette, IN, USA, Oct. 23, 2017. <https://doi.org/10.12783/asc2017/15339>.

8. Gutiérrez Arias G., Jiménez Díaz F., Rúa Ramirez E., Valcarcel Guzman J. Thermal Analysis by Finite Elements of Hotends for 3D Printing by Fused Filament Fabrication. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2021. 65(2). P. 129–133. <https://doi.org/10.3311/PPme.16203>.

9. Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J. A., Gomez-Gras G., Freixedes, J. Design of Open Source 3D Printer Extruder and Modelling of Thermal Performance with FEA. *The 19th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"* (TMT). Barcelona, Spain, Jul. 22-23, 2015.

10. Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J. A., Corbella X., Busqué R., Gomez-Gras G. Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier. *Mechatronics*. 2016. 36. P. 119–126.

11. Günel O., Koc E., Tiryaki G. Investigation of Heat Sink Geometry Effect on Cooling Performance for a FDM 3D Printer Liquefier. *The International Conference on Energy and Thermal Engineering*. Istanbul, Turkey, 2017. P. 569–573.

12. Günel O., Koc E., Yavuz T. Investigation of Thermal Effect on 3D Printer Liquefier of different Cooling Fan Nozzle Geometry. *International Conference on Energy and Thermal Engineering*. Istanbul, Turkey, 2017. P. 418–422.

13. Поліщук А. О. Розробка конструкції шнекового екструдера 3D-принтера, що

hranuly abo podribneni chastky polimeru v yakosti vykhidnoi syrovyny [Development of a screw extruder design for a 3D printer that uses granules or crushed polymer particles as raw materials]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh* = *Technologies and engineering*, No. 5 [in Ukrainian].

14. Polishchuk, O. S., Zozulya, P. F., Polishchuk, A. O. (2017). Uzahalnena klasyfikatsiia filamentiv dlia 3D-druku [Generalized classification of filaments for 3D printing]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu* = *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, No. 6, P. 51–59 [in Ukrainian].

15. Sylikonova huma 2mm [Silicone rubber 2 mm]. URL: <http://surl.li/nooth> [in Ukrainian].

16. Prozoryi sylikonovyi humovyi lyst [Transparent silicone rubber sheet]. URL: <http://surl.li/nootv> [in Ukrainian].

17. Extrusion System. URL: <https://jetclay.com/project/open-source-clay-extrusion-system>.

18. Jo, J. H., Jo, B. W., Cho, W., Kim, J.-H. (2020). Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. March. DOI: 10.1186/s40069-019-0388-2.

19. Lin, T., Zhao, Z., Wang, T., Pan, Ye-T. (2023). Three-Dimensional Printing of Large Ceramic Products and Process Simulation. *Materials*. 2023. № 16. <https://doi.org/10.3390/ma16103815>.

20. Kurska, T. M., Chernobay, G. O., Eremenko, S. B. (2008). Materialoznavstvo ta tekhnolohiia materialiv: konspekt leksii [Materials science and materials technology: synopsis of lectures]. Kharkiv: UCZU. 136 p. [in Ukrainian].

21. Fizychni vlastyvyosti i tekhnichni kharakterystyky ftoroplasta [Physical properties and technical characteristics of fluoroplastic]. URL: <http://kaprolon.com.ua/svoistva-i-harakteristiki-ftoroplasta/> [in Ukrainian].

22. Properties and types of Fluoroplastics (Teflon). Basic information about fluoroplastics URL: <https://baltro.cz/en/properties-and-types-of-fluoroplastics-teflon/>.

23. Ftoroplast-4 (PTFE) [Fluoroplast-4 (PTFE)]. URL: <https://santex-kyev.com.ua/products/ftoroplast>.

24. Polishchuk, A., Polishchuk, O., Lisevich, S., Urbanyuk, E., Rubanka, M. (2023). Kompozytsiini sumishi na osnovi syntetychnykh polimeriv i napovnuvachiv ta obladnannia dlia 3D-druku nymy [Composite mixtures based on synthetic polymers and fillers and equipment for 3D printing with them]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho*

використовує гранули або подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 5.

14. Поліщук О. С., Зозуля П. Ф., Поліщук А. О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2017. № 6. С. 51–59.

15. Силіконова гума 2мм. URL: <http://surl.li/nooth>.

16. Прозорий силіконовий гумовий лист. URL: <http://surl.li/nootv>.

17. Extrusion System. URL: <https://jetclay.com/project/open-source-clay-extrusion-system>.

18. Jo J. H., Jo B. W., Cho W., Kim J.-H. Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. March. DOI: 10.1186/s40069-019-0388-2.

19. Lin T., Zhao Z., Wang T., Pan Ye-T. Three-Dimensional Printing of Large Ceramic Products and Process Simulation. *Materials*. 2023. № 16. <https://doi.org/10.3390/ma16103815>.

20. Курська Т. М., Чернобай Г. О., Єрьоменко С. Б. Матеріалознавство та технологія матеріалів: конспект лекцій. Х.: УЦЗУ, 2008. 136 с.

21. Фізичні властивості і технічні характеристики фторопласта. URL: <http://kaprolon.com.ua/svoistva-i-harakteristiki-ftoroplasta/>.

22. Properties and types of Fluoroplastics (Teflon). Basic information about fluoroplastics. URL: <https://baltro.cz/en/properties-and-types-of-fluoroplastics-teflon/>.

23. Фторопласт-4 (PTFE). URL: <https://santex-kyev.com.ua/products/ftoroplast>.

24. Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. Композиційні суміші на основі синтетичних полімерів і наповнювачів та обладнання для 3D-друку ними. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. Ч. 1. № 2. С. 104–110.

universytetu = Bulletin of the Khmelnytskyi National University, Part 1, No. 2, P. 104–110 [in Ukrainian].

25. Kompozytni materialy [Composite materials]. URL: <http://rts-ua.com/kompozitnye-materialy/>.

26. Flubon. URL: <https://nauka.khmnmu.edu.ua/flubon/> [in Ukrainian].

27. Anycubic 4 Max Pro 2.0 3D printer. URL: <http://surl.li/nvpgk> [in Ukrainian].

28. Teplovizor dlia enerhoaudytu [Thermal imager for energy audit (80x60) WALCOM HT-03]. <https://simvolt.ua/teplovizor-dlya-energoauditu-80x60-walcom-ht-03/> [in Ukrainian].

29. SolidWorks Simulation URL: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation>.

30. Shcho take fum-strichka i dlia choho вона використовуюється? [What is fum tape and what is it used for?]. URL: <https://pkf-elektroplast.com.ua/ua/a399204-chto-takoe-fum.html> [in Ukrainian].

31. Kaptonovy skotch [Kapton adhesive tape]. URL: <https://akum.in.ua/ua/kaptonovyj-skotch-08h30-mm-33-m/> [in Ukrainian].

32. Termorezistor NTC 3950 100kOm iz provodom [Thermistor NTC 3950 100 kΩ with conductor]. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/termorezistor-ntc-3950-100-kom-s-kabelem> [in Ukrainian].

33. Arduino UNO R3 URL: <https://arduino.ua/prod2610-arduino-uno-r3-ch340>.

34. Suslikov, L. M., Studenyak, I. P. (2014). Metrolohiia ta vymiriuvannia: navchalnyi posibnyk [Metrology and measurement: study guide]. Uzhhorod: UzhNU Publishing House. 292 p. [in Ukrainian].

25. Композитні матеріали. URL: <http://rts-ua.com/kompozitnye-materialy/>.

26. Флубон. URL: <https://nauka.khmnmu.edu.ua/flubon/>.

27. Anycubic 4 Max Pro 2.0 3D принтер. URL: <http://surl.li/nvpgk>.

28. Тепловізор для энергоаудиту (80x60) WALCOM HT-03. URL: <https://simvolt.ua/teplovizor-dlya-energoauditu-80x60-walcom-ht-03/>.

29. SolidWorks Simulation. URL: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation>.

30. Що таке фум-стрічка і для чого вона використовується? URL: <https://pkf-elektroplast.com.ua/ua/a399204-chto-takoe-fum.html>.

31. Каптоновий скотч. URL: <https://akum.in.ua/ua/kaptonovyj-skotch-08h30-mm-33-m/>.

32. Терморезистор NTC 3950 100кОм із проводом. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/termorezistor-ntc-3950-100-kom-s-kabelem>.

33. Arduino UNO R3. URL: <https://arduino.ua/prod2610-arduino-uno-r3-ch340>.

34. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УЖНУ, 2014. 292 с.

POLISHCHUK ANDRII

Postgraduate student,

Department of machines and apparatuses,
electromechanical and energy systems,

Khmelnytskyi National University, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>

Scopus Author ID: 57221085232

E-mail: andrepol215@gmail.com

POLISHCHUK A. O.

Khmelnytskyi National University, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE COOLING SYSTEM OF THE SCREW EXTRUDER BODY OF THE 3D PRINTER

Purpose. The development of a cooling system for the 3D-printer screw extruder housing, which is aimed at reducing the overheating of the polymer material during extrusion and increasing the accuracy and quality of printing finished parts.

Methodology. A complex of theoretical, empirical, and statistical methods was used in the work to implement the proposed tasks and test the formulated hypotheses. Theoretical and experimental studies were based on fundamental knowledge in the field of mechanical engineering, heat engineering, and also took into account the features and requirements related to polymer processing. Mathematical processing of the research results was carried out using MS Excel software.

Findings. A cooling system for the body of a 3D printer screw extruder has been developed using a material cylinder with fins for heat dissipation, two fans and a thermal barrier. Heat-insulating pads (barriers) for the extruder of a 3D printer made of silicone, Teflon (fluoroplastic 4) and flubon. Their thermal conductivity was studied. With the use of SolidWorks Simulation, a static and transient thermal analysis of the cooling system of the screw extruder body of the 3D printer was performed. A measuring system was developed for setting the temperature of the screw extruder at five points. Experimental studies were conducted to determine the temperature on the nozzle; on the heating element; on the cooling fins of the material cylinder, under the heat-insulating gasket, inside the loading hopper and on its body. Graphs of temperature changes over time in different places of the screw extruder when using different elements of the cooling system are plotted. A comparison of screw extruder temperatures determined theoretically using SolidWorks Simulation and experimentally using a measuring system and a thermal imaging camera was made.

Originality. Rational relations between the elements of the cooling system of the screw extruder body of the 3D printer have been established, which make it possible to prevent overheating of the extruder and improve the quality of the extrusion process and the production of finished products.

Practical value. A cooling system for the screw extruder body of the 3D printer has been developed, which will significantly increase the efficiency and reliability of the 3D printing process. Such a system will also contribute to increasing the durability of equipment, reducing production costs by preventing defects in 3D printing products associated with temperature fluctuations, and improving their quality. In addition, effective cooling will enable the use of a wider range of polymer materials, including those with higher temperature requirements, thereby expanding the capabilities of 3D printing and providing greater flexibility in manufacturing.

Keywords: 3D printer; 3D printing; screw extruder; cooling system; thermal barrier; thermal insulation pad; SolidWorks Simulation; temperature sensor; thermal imaging camera.