

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-10>

УДК 681.5

О. А. Новохат¹, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-1198-6675

Д. І. Гончаренко¹, магістр¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: novokhatoleh@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИМУЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У НАПУСКНОМУ ПРИСТРОЇ ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА

Анотація. Наведено алгоритм створення комп'ютерної симуляції, що відтворює процес утворення розплаву полімеру в напускному пристрої екструдера 3D-принтера. Встановлено параметри налаштування в модулі Flow Simulation програмного забезпечення SOLIDWORKS, а також граничні та початкові умови процесу. Представлено результати моделювання у вигляді візуального розподілу температурних полів у напускному пристрої екструдера, а також у потоці полімеру. Описано графічну залежність зміни температури напускного пристрою під час його нагрівання та впродовж усталеного режиму. Наведено рекомендації до застосування розробленого алгоритму моделювання комп'ютерної симуляції.

Ключові слова: екструдери, моделювання, комп'ютерна симуляція, температурне поле, полімери, розплав.

Постановка проблеми. Широко розповсюдженим матеріалом є різноманітні термопластичні полімерні вироби. Одним зі способів їх виготовлення є екструзія шляхом продавлення матеріалу через екструзійну головку. Іншим перспективним способом утворення полімерних виробів є використання 3D-принтерів. Останнім часом такі пристрої все частіше почали застосовуватись для друку елементів різноманітних механізмів у різних галузях, зокрема й машинобудуванні, адже такий спосіб виробництва дозволяє автоматизувати процес, створювати вироби складної конфігурації та високої якості [1].

Однією з проблем використання технології 3D-друку є забезпечення рівномірності нагрівання полімеру для утворення розплаву та рівномірної його подачі під час друку – формування тривимірного об'єкта. Крім того, важливо ще на стадії проектування елементів 3D-принтера, зокрема його напускного пристрою екструдера, визначати характер розподілу температурних полів під час нагрівання та характер потоку полімеру.

Аналіз останніх досліджень. Літературний огляд показав, що технологія 3D-друку набула широкого розповсюдження [2; 3]. На початку винайдення 3D-принтери мали досить вузьку сферу застосування. Проте ситуація швидко змінилась [4]. Наразі технологія тривимірного друку поширена від побутового використання до масштабного в різноманітних галузях, зокрема в машинобудуванні для виробництва деталей складної конфігурації й не тільки [5; 6; 7].

Встановлено, що якість виробів 3D-друку напряму залежить від теплообмінних процесів у напускному пристрої екструдера. Адже від рівномірності нагрівання полімеру та геометрії конструкції залежить якість напуску розплаву та мінімізація турбулентності його потоку. Лише за таких задовільних параметрів шари розплаву полімеру будуть лягати щільними шарами та формувати безпористий тривимірний виріб [8; 9].

Поширеним способом дослідження нової конструкції пристрою є виготовлення експериментального зразка та проведення дослідів, проте це призводить до збільшення затрат та часу на модернізацію конструкцій.

Установлено, що актуальним є моделювання комп'ютерної симуляції процесів [10]. Це дасть змогу досліджувати вплив різноманітних фізичних факторів та геометрії конструкції пристрою на процес виготовлення без попереднього виготовлення експериментальних зразків самого пристрою, адже без розуміння, яким чином розподіляється температурне поле в потоці полімеру та самому напускному пристрої, важко спрогнозувати про якість накладання шарів полімеру в готовому виробі [11]. Це ускладнює розроблення нових та модернізацію наявних напускних пристроїв екструдера 3D-принтера [12].

Проте в сучасних літературних джерелах недостатньо інформації щодо точного налаштування CAD-системи для отримання розподілу температурних полів усередині напускних пристроїв.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою є визначення розподілу температурних полів усередині напускного пристрою екструдера під час нагрівання полімеру шляхом комп'ютерного симуляційного моделювання відповідного процесу. Для цього необхідно визначити алгоритм постановки відповідного симуляційного моделювання. За середовище створення тривимірної моделі напускного пристрою екструдера 3D-принтера взято CAD-систему SOLIDWORKS [13]. Для проведення симуляційного моделювання вибрано її модуль Flow Simulation [14].

Основна частина. На першому етапі створення симуляції розподілу температурних полів у потоці розплаву та напускному пристрої екструдера необхідно побудувати її тривимірну модель.

Процес моделювання розпочинається зі створення ескізу поперечного перерізу сопла (рис. 1). Для цього частково задається його контур та основні геометричні параметри, зокрема діаметр вхідного отвору для полімеру, довжина зони нагрівання, конфігурація конічної частини та розміри вихідного каналу. Подальше формування внутрішньої порожнини здійснюється шляхом операцій обертання та вирізання. Висока точність дотримання розрахункових розмірів є критичною, оскільки вона безпосередньо впливає на достовірність і коректність наступних симуляційних розрахунків.

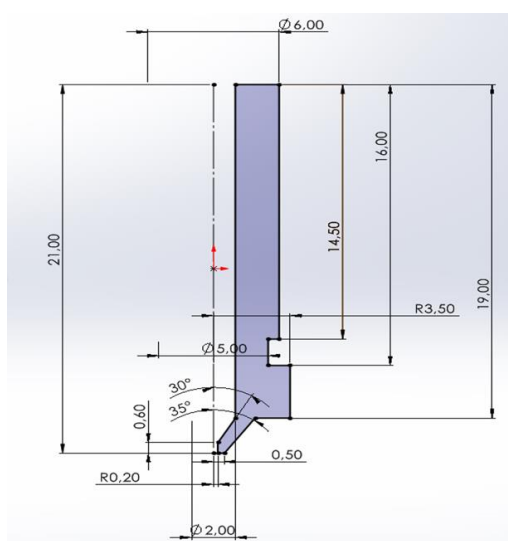


Рис. 1. Ескіз напускного пристрою екструдера

Після завершення формування геометричної моделі додаються конструктивні елементи, зокрема нанесення різьби для кріплення (рис. 2). Також важливим аспектом є вибір матеріалу деталей, оскільки його теплопровідність суттєво впливає на ефективність процесів нагріву та охолодження. Зазвичай для цих цілей використовуються латунь або мідь, зважаючи на їхні високі теплофізичні характеристики, в даному випадку матеріалом виготовлення є латунь.

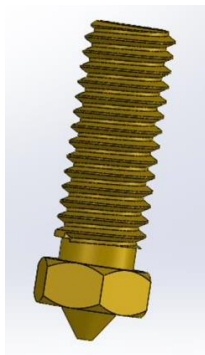


Рис. 2. Тривимірна модель головки екструдера

На завершальному етапі до тривимірної моделі додаються побудовані аналогічним чином інші елементи. Їх розташування здійснюється шляхом задання відповідних зв'язків та співвідношень між собою, зокрема контакту, співвісності та паралельності. Це забезпечує коректне позиціонування всіх деталей у конструкції і гарантує їх правильну взаємодію в процесі симуляційного моделювання. Готову тривимірну збірку напускного пристрою екструдера разом із тепловідвідною частиною показано на рис. 3.

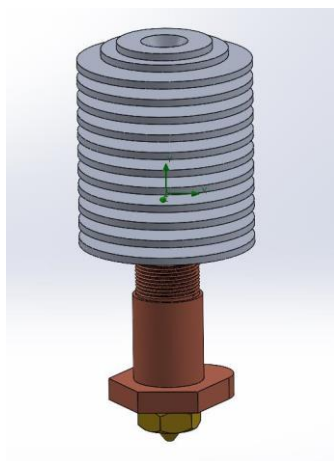


Рис. 3. Тривимірна модель напускного пристрою екструдера

Подальша робота базується на задання параметрів симуляції протікання розплаву полімеру через головку екструдера в модулі SOLIDWORKS Flow Simulation [15].

Для забезпечення точності проведення симуляційного моделювання на вхідному та вихідному отворах розміщуються умовні заглушки (рис. 4).

Подальші налаштування полягають у заданні розмірностей вимірювання фізичних величин (рис. 5) та типу аналізу (рис. 6).

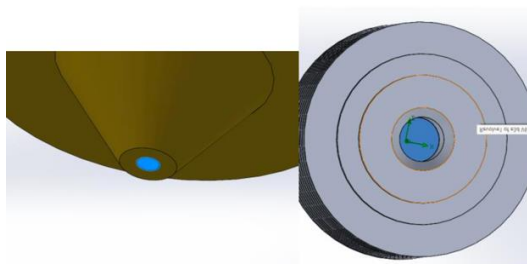


Рис. 4. Опломбування отворів

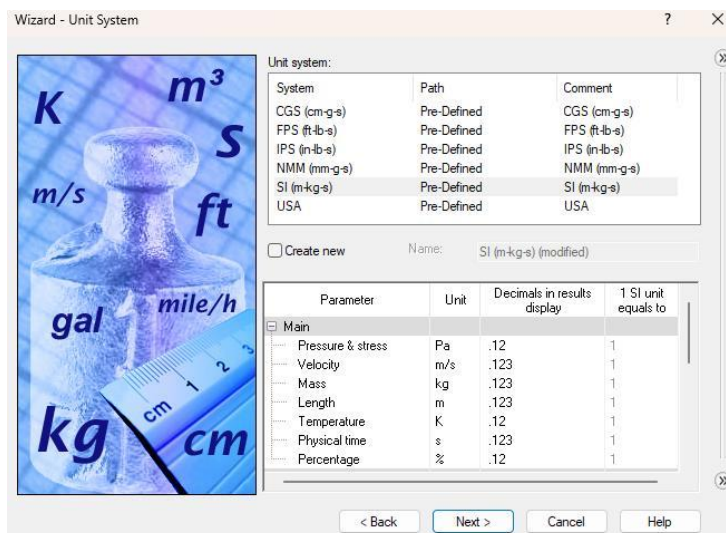


Рис. 5. Задання розмірностей фізичних величин

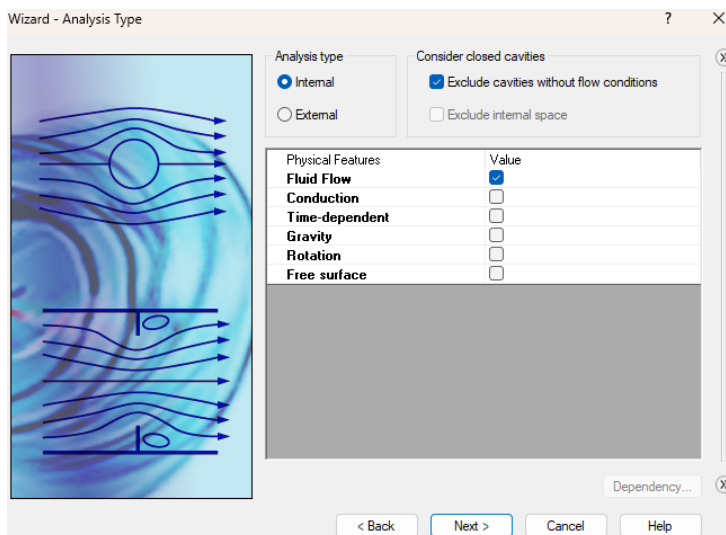


Рис. 6. Задання типу аналізу

За середовище, що протікає всередині головки екструдера, вибрано матеріал PETG. Його було додано до бібліотеки SOLIDWORKS із заданням необхідних теплофізичних характеристик, що відповідають властивостям реального полімерного розплаву.

Усередині каналу головки екструдера за деяких умов можливе виникнення турбулентного режиму розплаву полімеру. Тому для опису режиму потоку середовища всередині каналу задано як ламінарний, так і турбулентний режими (рис. 7).

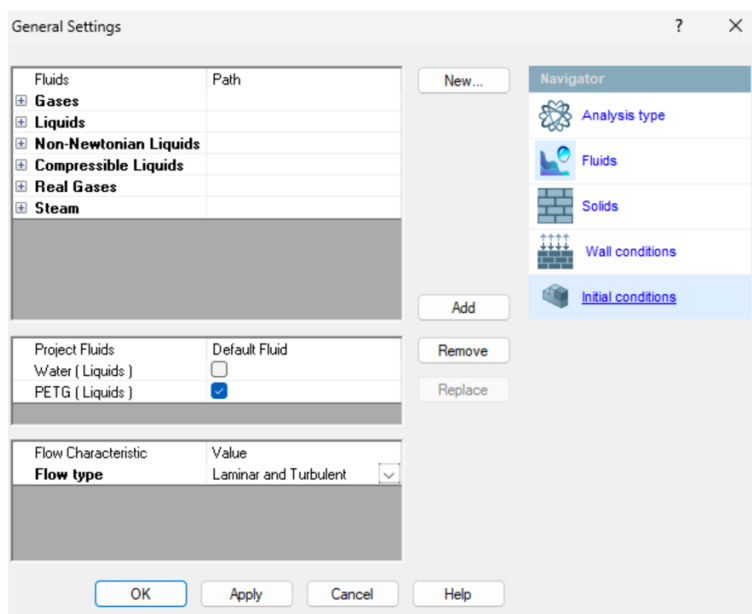


Рис. 7. Задання типу матеріалу та режиму потоку

Потік полімерного розплаву в симуляційному моделюванні спрямовується завдяки вказівці попередньо доданих заглушок як вхідного та вихідного отворів каналу.

Задання граничних умов базується на використанні відомих фізичних законів. Зокрема, тепловіддача від поверхні тривимірної моделі в навколишнє середовище описується законом Ньютона-Ріхмана. Також під час нагрівання металевого тіла з поверхні генерується випромінювання теплоти за законом Стефана-Больцмана. Теплопровідність середовища описується законом Фур'є.

Також задаються початкові умови протікання процесу в головці екструдера. Зокрема, вказуються початкова температура, тиск навколишнього середовища (атмосферний), витрата полімерного розплаву.

Під час визначення параметрів у різних точках тривимірної моделі застосовується автоматична генерація сітки (рис. 8). Для збільшення точності розрахунків збільшено щільність розміщення вузлів, особливо там, де відбуваються суттєві зміни параметрів. Це зменшує похибку вимірювання і надає можливість отримувати більш точні дані.

За допомогою постпроцесингових інструментів модуля Flow Simulation отримано візуалізацію розподілу температурних полів напускного пристрою екструдера (рис. 9).

Аналіз результатів комп'ютерної симуляції (рис. 9) показав таке:

1. Температура зони підводу полімеру (верхня частина напускного пристрою) має рівномірний спадний характер. Це свідчить про ефективність тепловідвідної конструкції;
2. Температура зони нагрівання полімеру (нижня частина напускного пристрою) однакова, що свідчить про рівномірність розігріву;
3. Максимальна температура напускного пристрою знаходиться в зоні нагрівання полімеру і становить 249,2 °C;
4. Мінімальна температура напускного пристрою знаходиться в зоні підводу полімеру і становить 48,25 °C;

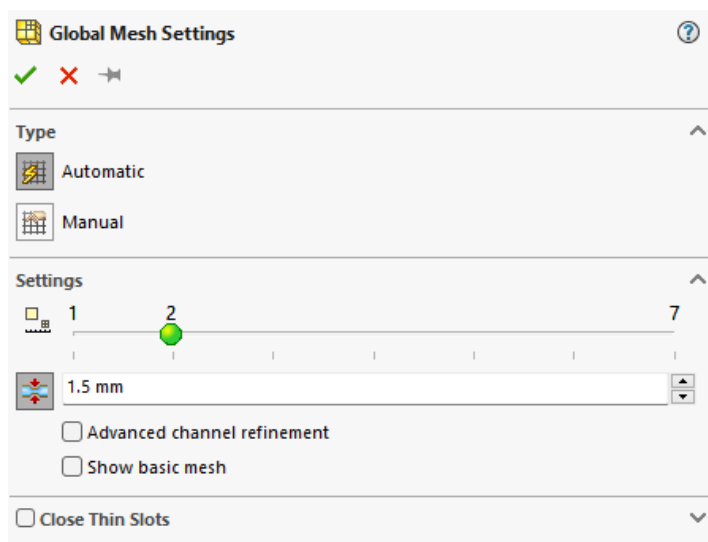


Рис. 8. Налаштування сітки

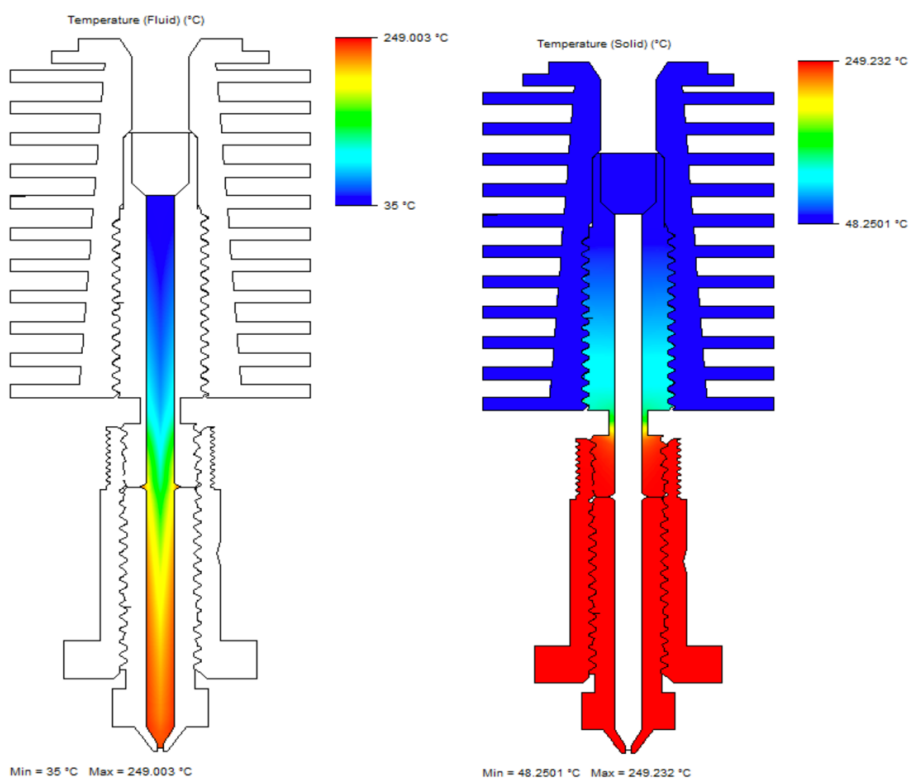


Рис. 9. Розподіл температурних полів у потоці полімеру (зліва) та напускному пристрої екструдера (справа)

5. Висока теплопровідність елементів конструкції дозволяє швидко підводити та відводити теплоту, сприяючи ефективності теплообмінних процесів;

6. Максимальна температура розплаву полімеру становить 249 °C, що майже рівне температурі головки екструдера. Це свідчить про високу ефективність теплообміну від внутрішньої поверхні каналу головки до розплаву;

7. Мінімальна температура розплаву полімеру становить 35 °С. Це значення менше за мінімальну температуру напускного пристрою з певної причини. Оскільки теплопровідність матеріалу пристрою висока, температурне поле від найбільш нагрітої частини ефективно розподіляється по всій його поверхні, в тому числі доходячи до найвіддаленішої точки. Полімер же рухається всередині каналу і потрапляє в напускний пристрій холодним, не встигаючи нагрітись до його температури, доки не потрапить до зони нагрівання;

8. Розподіл температур у поперечному перерізі потоку полімеру може різнитись через його рух. Так, шари полімеру, що безпосередньо контактують із більш нагрітою внутрішньою стінкою напускного пристрою, прогріваються швидше, ніж більш глибокі шари;

9. Характер розподілу температур у розплаві полімеру свідчить про відсутність вираженої турбулентності потоку та застійних зон. Це дає змогу рівномірно виходити розплав полімеру з головки екструдера.

Кінетику нагрівання головки екструдера та подальше підтримання значення її температури показано на рис. 10.

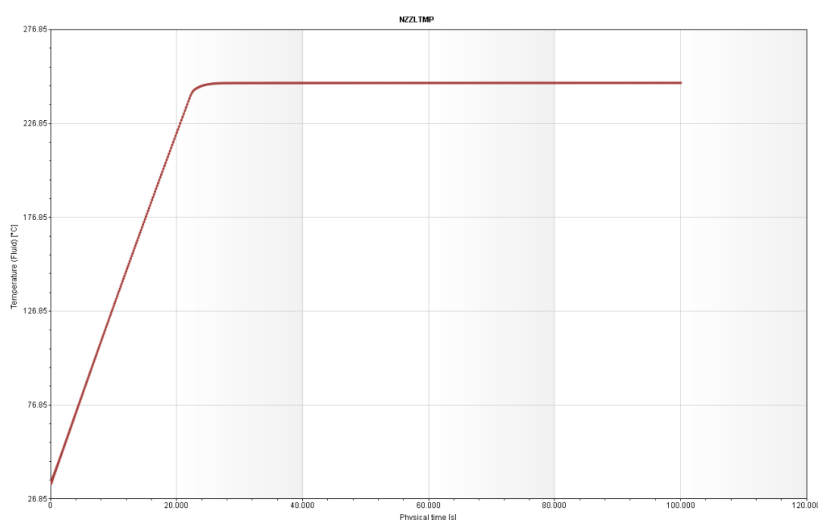


Рис. 10. Залежність температури головки екструдера від часу

Швидкість нагрівання має прямолінійний характер зростання і залежить від потужності нагрівного елемента.

Висновки. Наведений алгоритм симуляційного моделювання розподілу температурних полів у напускному пристрої екструдера дає змогу відтворити таку процедуру для подібних пристроїв.

Отримані дані щодо розподілу температурних полів допоможуть визначити температуру в кожній точці конструкції. За цими даними можна знайти шляхи вдосконалення конструкції з метою покращення теплообмінних процесів від нагрівного елемента до розплаву полімеру, а також конструкції охолодження зони підводу.

Симуляційна модель також дозволяє контролювати зміну температури в потоці полімеру та визначати режим руху кожній точці каналу. Завдяки цьому можна на стадії симуляції визначити наявність осередків застійних зон та турбулентності потоку полімеру, що може негативно позначитись на якості напуску розплаву.

*Список використаних джерел*

1. Chua C. K., Leong K. F. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications: The 5th Edition of Rapid Prototyping: Principles and Applications. Singapore: World Scientific Publishing, 2017. 430 p. <https://doi.org/10.1142/10200>
2. Edgar J., Tint S. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd Edition. *Johnson Matthey Technology Review*. 2015. V. 59, № 3. P. 193–198. <https://doi.org/10.1595/205651315X688406>
3. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2014. 484 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
4. Lipson, H., Kurman, M. Fabricated: The New World of 3D Printing. –Indianapolis: John Wiley & Sons, 2013. 320 p.
5. Gebhardt A. Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Munich: Carl Hanser Verlag, 2011. 219 p. <https://doi.org/10.3139/9783446431621.fm>
6. Hopkinson N., Hague R. J. M., Dickens P. Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age. Chichester: Wiley, 2006. 310 p. <https://doi.org/10.1002/0470033991>
7. Gebhardt A., Höttner J.–S. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: Hanser Publishers, 2016. 311 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-56990-583-8>
8. Rouf S., Raina A., Haq M. I. U., Naveed N., Jeganmohan S., Kichloo A. F. 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2022. V. 5. № 3. P. 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.02.001>
9. Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. V. 143. P. 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
10. Yu A Antokhina, V M Balashov, E G Semenova, A G Varzhapetyan. Computer simulation of processes in technical systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. № 1619. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012069>
11. Veselý P. Nozzle Temperature Effect on 3D Printed Structure Properties. *ELEKTROTECHNOLÓGIA* 2019: Slovakia. 2019. P. 126–131.
12. Wang J., Chen H.-J., Gong Y.-J., Wang Q., Ren J. Optimization Design of Printing Nozzle for a Delta 3d Printer. 3rd Advances in Engineering Research (AER). 2017. V. 105. P. 820–825. <https://doi.org/10.2991/mme-16.2017.114>
13. SOLIDWORKS 3D CAD. URL: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad>
14. SOLIDWORKS Flow Simulation. URL: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>
15. An Introduction to Flow Analysis Applications with SolidWorks Flow Simulation. URL: https://www.solidworks.com/sw/docs/flow_sim_studentwb_2011_eng.pdf

Стаття надійшла до редакції 25.03.2025 р.

O. Novokhat, D. Honcharenko

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**MODELING OF COMPUTER SIMULATION OF TEMPERATURE FIELD
DISTRIBUTION IN THE EXTRUDER FEEDING DEVICE**

Summary

The algorithm for creating a computer simulation that replicates the process of polymer melt formation in the extruder feeding device, particularly in a 3D printer, is presented. The configuration parameters in the Flow Simulation module of SOLIDWORKS software, as well as the boundary and initial conditions of the process, have been established. The simulation results are provided in the form of a visual representation of the temperature field distribution within the extruder feeding device and in the polymer flow. A graphical dependence illustrating temperature variations of the feeding device during heating and in the steady-state mode is described. Recommendations for the application of the developed computer simulation modeling algorithm are provided.

Keywords: extruder, modeling, computer simulation, temperature, temperature field, polymer, melt.