

ПОЛИЩУК ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>e-mail: polishchuko@khmnu.edu.ua**КУНЦОВ ОЛЕКСАНДР**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0007-8825-9285>e-mail: kuntsov.oleksandr@khmnu.edu.ua**ПІДГАЙЧУК СВІТЛАНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9868-6447>e-mail: svitlankayar@gmail.com**ЗАГУРОВСЬКИЙ МАКСИМ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0007-8839-2422>e-mail: blonskiy123@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ MOLDEX3D ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ПІДОШВИ З В'ЯЗКОРІДКОГО ПОЛІМЕРУ ТА АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ ЗАПОВНЕННЯ

Розглянуто застосування програмного комплексу Moldex3D для моделювання процесу лиття під тиском полімерної підшви взуття з в'язкорідкого матеріалу. Наведено послідовність побудови цифрової моделі формотворної порожнини, генерації скінченно-елементної сітки, задання реологічних властивостей полімерного розплаву та технологічних параметрів процесу заповнення. Проведено чисельний аналіз просторового розподілу швидкості потоку, в'язкості, частки застиглого шару, інтенсивності зсувних деформацій та компонент швидкості в порожнині прес-форми. Показано, що використання Moldex3D дозволяє ідентифікувати зони ризику виникнення типових дефектів лиття (неповне заповнення, передчасне замерзання розплаву, локальні перенавантаження зсувом) та виконувати попередню оптимізацію режимів лиття і конфігурації ливникової системи без виготовлення експериментальних прес-форм. Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції CAE-симуляції в цикл проектування взуттєвих підшов на основі полімерних матеріалів.

Ключові слова: лиття під тиском, підшва взуття, розплав полімеру, в'язкорідкий потік, Moldex3D, скінченно-елементне моделювання, швидкість заповнення, застиглий шар.

POLISHCHUK OLEG, KUNTSOV OLEKSANDR, PIDHAICHUK SVITLANA, ZAHUROVSKYI MAKSYM

Khmelnytskyi National University

APPLICATION OF MOLDEX3D FOR MODELING THE INJECTION MOLDING PROCESS OF A SHOE SOLE MADE OF VISCOUS POLYMER AND ANALYSIS OF FILLING PARAMETERS

The paper presents the application of the Moldex3D computer-aided engineering (CAE) software for detailed simulation of the injection molding process of a shoe sole manufactured from a viscous polymer melt. The main objective of the study is to demonstrate how Moldex3D can be used not only as a visualization tool, but as a virtual laboratory that supports engineering decisions at the early stages of mold and process design. The workflow includes CAD model preparation of the shoe sole geometry, import and healing of surfaces, finite element mesh generation with local refinement in thin sections and near the gates, and assignment of rheological, thermal and processing data for the selected polymer grade.

Numerical analysis is performed for the filling stage of the molding cycle. The software provides contour plots and vector fields for the spatial distribution of flow velocity, viscosity, frozen-layer ratio, shear rate and individual velocity components in the mold cavity. These results make it possible to identify regions of accelerated and decelerated flow, early solidification near colder mold walls, and areas with excessive shear loading that may lead to material degradation. Special attention is paid to the detection of risk zones for typical injection molding defects, such as short shots, weld lines, air entrapment, local sink marks and non-uniform packing.

It is shown that Moldex3D simulations give a physically consistent picture of the filling process and can be effectively used to perform preliminary optimization of injection pressure, melt and mold temperatures, filling time and runner/gate configuration without manufacturing experimental molds. The results confirm the usefulness of CAE-based simulation as an integral part of the design and engineering cycle for polymer shoe soles, helping to reduce development time, material consumption and the number of trial-and-error iterations on real equipment.

Keywords: injection molding, shoe sole, polymer melt, viscous flow, Moldex3D, finite element simulation, filling velocity, frozen layer, shear rate

Стаття надійшла до редакції / Received 22.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Вступ

Лиття полімерних матеріалів під тиском є одним із базових процесів виготовлення деталей низу взуття, що забезпечує високу продуктивність, стабільну геометрію та можливість формування складного рельєфу підшви. Якість готового виробу суттєво залежить від режимів заповнення порожнини прес-форми, реологічних властивостей розплаву, конструкції ливникової системи й ефективності охолодження. Неправильно підібрані параметри можуть призвести до дефектів, таких як коротке заповнення (short shot), утворення ліній спаю, неоднорідна усадка, локальні внутрішні напруження та короблення виробу [3, 7–9].

Сучасні підходи до моделювання течій в'язкорідких середовищ базуються на рівняннях Нав'є–Стокса з урахуванням неньютонівських реологічних моделей та чисельних методів – насамперед методу скінченних елементів (МСЕ) та скінченно-об'ємних методів [1, 11, 14–16]. Додатково враховується ейлерове та лагранжеве

подання течії, а також варіаційні принципи механіки суцільного середовища [2, 16, 20]. Це створює теоретичне підґрунтя для реалізації комп'ютерних симуляцій у спеціалізованих CAE-комплексах.

Однією з таких систем є Moldex3D, що орієнтована на аналіз процесів лиття термопластів і каучуків під тиском. Вона поєднує модулі побудови сітки, задання матеріалів, визначення технологічних параметрів та аналізу результатів у вигляді карт тиску, швидкості, температури, в'язкості, частки застиглого шару, усадки та короблення [18]. У дослідженні зроблено акцент саме на використанні Moldex3D для детального аналізу параметрів заповнення формотворної порожнини прес-форми підшоши взуття.

Огляд літератури та постановка задачі

Моделювання течії в'язкорідких рідин у каналах складної геометрії є класичною задачею механіки суцільного середовища. У роботі [1] запропоновано підхід до апроксимації в'язкісних розв'язків системи Ейлера для опису течій із врахуванням нелінійності в'язкості, що є важливим для побудови чисельних алгоритмів. У праці [2] детально розглянуто ейлерове й лагранжеве подання течії, що використовується під час інтерпретації результатів чисельних експериментів і побудови гібридних методів.

Фундаментальні основи фізичної хімії полімерів, фазових переходів та релаксаційних процесів, які визначають реологічну поведінку розплавів, подано в монографіях [3, 4]. Окрему увагу приділено температурній залежності в'язкості, структуроутворенню та зміні властивостей під час охолодження. Для процесів перероблення термопластів у прес-формах стадії впорскування, ущільнення й охолодження детально розглянуто в роботах [17–19], де також наведено рекомендації щодо вибору конструкції форми й режимів лиття.

Математичні моделі заповнення порожнини прес-форми розплавом полімерного матеріалу для деталей взуття подано у роботах [5–7, 9, 10]. Показано можливість опису руху в'язкого потоку з вільною поверхнею в каналах складної геометрії з урахуванням часу твердіння та еволюції в'язкості. Окремі задачі вільної поверхні та турбулентних потоків над шорсткими границями розглянуто в [12, 13], що важливо для коректного трактування поведінки фронту розплаву в тонкостінних елементах.

Значний внесок у розвиток чисельних методів моделювання заповнення прес-форм неньютонівськими рідинами зроблено в роботах [14, 15], де розглянуто вдосконалені CVFEM/VOF-методи. У варіаційній постановці задач течії узагальнених ньютонівських рідин підходи подано в [11, 16]. Спеціалізований посібник [18] містить систематизований виклад теорії та практики моделювання процесів лиття під тиском за допомогою Moldex3D.

У цій роботі ставиться задача: виконати моделювання процесу заповнення формотворної порожнини прес-форми підшоши взуття у програмному комплексі Moldex3D; проаналізувати карти швидкості потоку, в'язкості, частки застиглого шару, інтенсивності зсуву та компонент швидкості; на основі отриманих результатів сформулювати рекомендації щодо налаштування режимів лиття під тиском.

Об'єкт дослідження та методика моделювання в Moldex3D

Об'єктом моделювання є формотворна порожнина прес-форми для лиття підшоши взуття з типовою товщиною 3–5 мм і наявністю елементів протектора. 3D-геометрію деталі створено в CAD-системі та експортовано у формат, сумісний із Moldex3D (STEP/Parasolid). На етапі препроцесингу виконано очищення геометрії, усунення дрібних проміжків і некоректних поверхонь, що запобігає помилкам під час побудови сітки.

У модулі побудови сітки Moldex3D сформовано скінченно-елементну сітку оболонкового типу з локальним згущенням у зонах різкої зміни товщини та поблизу ливникових каналів. Загальна кількість елементів становила порядку $1,5\text{--}2 \cdot 10^4$, що забезпечує компроміс між точністю розрахунку та часом обчислень [11, 18]. Для дослідження чутливості результатів до густини сітки було виконано кілька варіантів дискретизації.

Як матеріал розглядали в'язкорідкий полімерний розплав типу термопластичного еластомеру, характерного для деталей низу взуття. Реологічні властивості описувалися узагальненою не ньютонівською моделлю в'язкості, що залежить від температури та швидкості зсуву. Температурну залежність в'язкості та густини задавали у вигляді таблиць, отриманих із довідникових даних виробника матеріалу та літературних джерел [3, 4, 17, 18].

У модулі процесного моделювання Moldex3D було задано температуру розплаву на вході ливникової системи, температуру стінок прес-форми, тиск упорскування та закон його зміни в часі, максимальний час заповнення порожнини, а також умови тепловідведення на межах деталі й прес-форми. Час заповнення обирався таким, щоб забезпечити повне заповнення формотворної порожнини без передчасного замерзання фронту потоку і без надмірного зростання тиску у віддалених ділянках [5, 6, 18].

У якості основних результатів моделювання аналізувалися карти векторів швидкості потоку, розподіл frozen layer ratio, карти molten core, інтенсивності зсувних деформацій (shear rate), просторового розподілу в'язкості та окремих компонент швидкості потоку. Саме ці параметри безпосередньо пов'язані з формуванням дефектів заповнення та якістю готової підшоши.

Результати моделювання та їх аналіз

Поле векторів швидкості потоку (рис. 1) показує, що максимальні значення швидкості спостерігаються у приповерхневих зонах поблизу ливникових каналів та у вузьких перетинах, де потік зазнає звуження. У центральних ділянках підшоши швидкість знижується, що свідчить про розширення потоку та зростання поперечного перерізу каналу течії. Подібна картина узгоджується з відомими результатами чисельного моделювання неньютонівських течій у каналах змінного перерізу [11, 14, 15].

Розподіл частки застиглого шару (рис. 2) демонструє, що найбільша товщина застиглого шару формується в тонких ділянках і поблизу холодніших стінок прес-форми, тоді як у центральних масивніших

зонах підошви зберігається більша частка molten core. Надмірне зростання частки застиглого шару на ранніх етапах може призвести до блокування подальшого надходження розплаву в окремі мікрооб'єми форми й утворення локальних порожнин або недоливу [18].

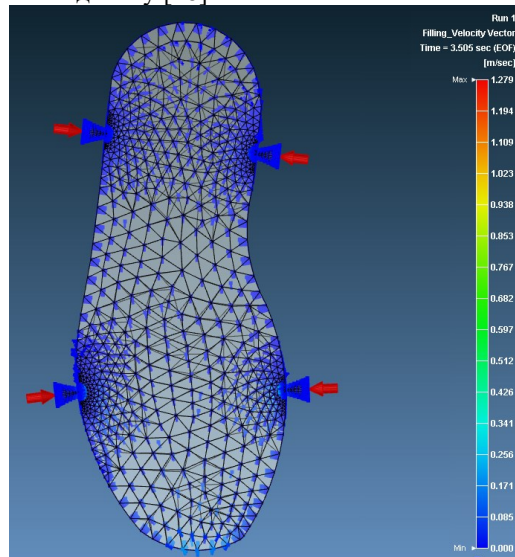


Рис.1. Поле векторів швидкості потоку під час заповнення формотвірної порожнини підошви в Moldex3D

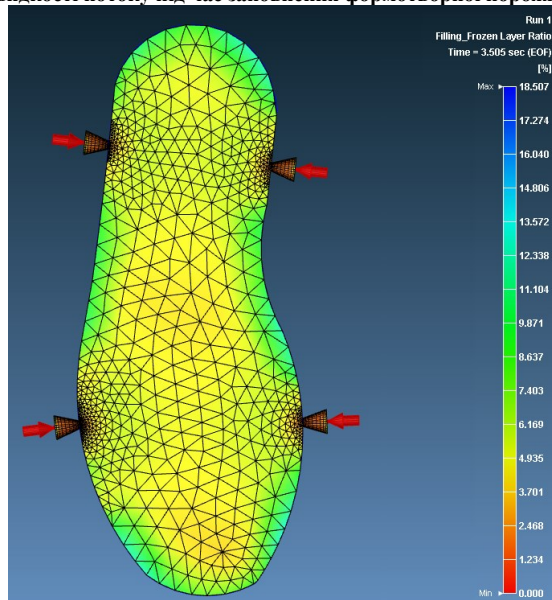


Рис.2. Розподіл частки застиглого шару полімеру на поверхні підошви (Frozen Layer Ratio)

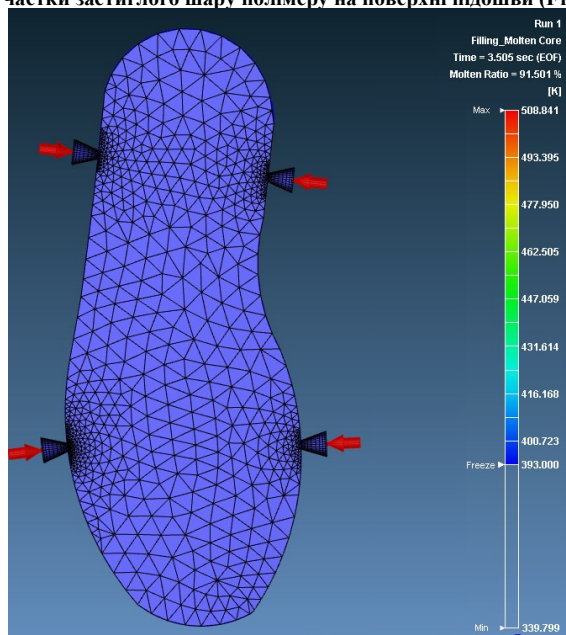


Рис. 3. Карта розподілу molten core в товщі підошви в процесі заповнення

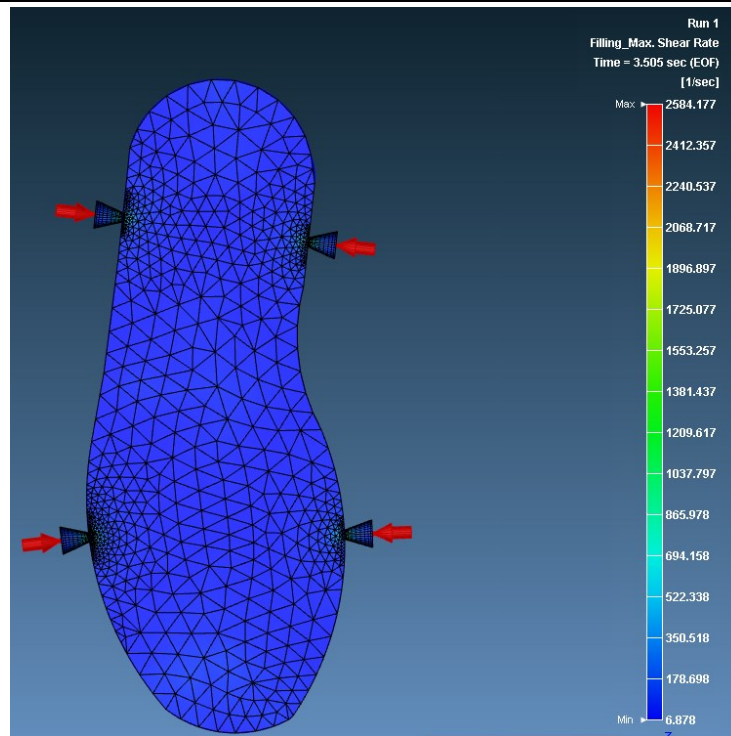


Рис.4. Розподіл інтенсивності зсувних деформацій (Shear Rate) в порожнині прес-форми підшви

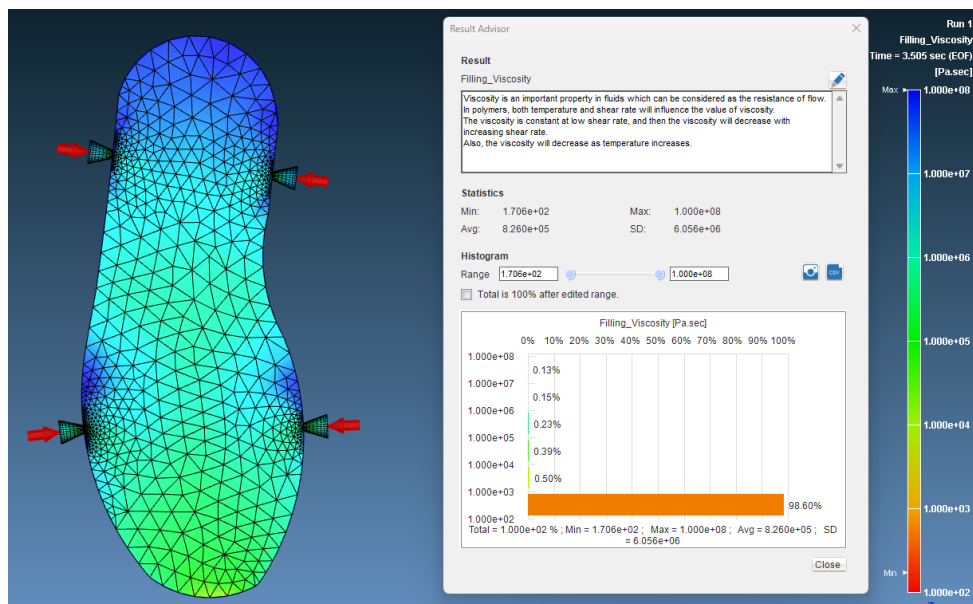


Рис.5.Просторовий розподіл в'язкості полімерного розплаву в порожнині підшви

Карта molten core (рис. 3) характеризує об'єм рідкої фази в товщі підшви на завершальній стадії заповнення. Наявність достатньо великої зони molten core є важливою для реалізації ефективної стадії витримки під тиском, коли додатковий розплав може компенсувати усадку та заповнити усадкові порожнини [6, 18, 19]. Водночас надто велика зона рідкої фази при недостатньому тиску може призвести до неоднорідної усадки та викривлення виробу.

Розподіл інтенсивності зсувних деформацій (рис. 4) показує, що найвищі значення shear rate спостерігаються в ділянках вузьких каналів та на границях сусідніх потоків, особливо поблизу ливників і поворотів потоку. Надмірні зсувні деформації можуть призводити до локального нагрівання матеріалу, деградації полімерного ланцюга та погіршення механічних властивостей [3, 4, 17]. Отриманий розподіл shear rate добре корелює з областями високої швидкості потоку та зменшеної в'язкості.

На карті в'язкості (рис. 5) видно, що вона зменшується в зонах підвищеної температури та високих швидкостей зсуву, тоді як у холодніших ділянках та поблизу стінок форми зростає. Такий характер розподілу є типовим для термопластів із залежною від температури та швидкості зсуву в'язкістю [3, 4, 16]. Перехідні області, де в'язкість різко змінюється, збігаються з критичними ділянками, у яких можливе передчасне замерзання потоку або формування ліній спаю.

Обговорення результатів

Проведені чисельні експерименти у Moldex3D показали, що навіть при фіксованій геометрії прес-форми та сталій ливниковій системі результати процесу лиття суттєво залежать від температури розплаву й прес-форми, часу та закону зміни тиску впорскування, співвідношення між швидкістю заповнення й ефективністю тепловідведення, а також від реологічних властивостей полімеру. Аналіз полів швидкості, в'язкості, frozen layer ratio і shear rate дозволив ідентифікувати зони підвищеного ризику дефектів заповнення та ліній спаю.

Отримані результати добре узгоджуються з висновками попередніх робіт щодо моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми для лиття підшви [5–7, 9], але розширюють їх за рахунок більш детального аналізу параметрів заповнення в середовищі Moldex3D. Застосування Moldex3D як «цифрової лабораторії» дає змогу проводити серії віртуальних експериментів зі зміною температурних і силових режимів, геометрії ливникової системи та властивостей матеріалу, що істотно скорочує потребу в дорогих і тривалих натурних випробуваннях [17–19].

Висновки

1. Показано, що програмний комплекс Moldex3D є ефективним інструментом для моделювання процесу лиття під тиском в'язкорідкого полімеру при виготовленні підшви взуття, дозволяючи детально аналізувати поля швидкості, в'язкості, частки застиглої фази, інтенсивності зсувних деформацій та компонент швидкості в формотвірній порожнині.

2. Встановлено, що нерівномірність швидкісного поля та пов'язані з нею локальні градієнти зсуву й в'язкості визначають зони можливого виникнення дефектів заповнення та ліній спаю, що слід враховувати при виборі режимів лиття та конфігурації ливникової системи.

3. Показано, що карти Frozen Layer Ratio та molten core є інформативними показниками для оцінювання ефективності режимів охолодження та витримки під тиском, а також для прогнозування усадки й стабільності геометрії готового виробу.

4. Аналіз просторового розподілу інтенсивності зсувних деформацій дає змогу виявляти ділянки, де можливе перевищення допустимих значень зсуву й деградація полімеру, що необхідно враховувати при виборі матеріалу й режимів лиття.

5. Застосування Moldex3D на етапі проектування прес-форми та вибору технологічних режимів дозволяє зменшити кількість натурних експериментів, скоротити терміни підготовки виробництва та підвищити якість полімерних деталей низу взуття.

Література

1. Feireisl E., Lukacova-Medvidova M., Schneide S. Approximating viscosity solutions of the Euler system. – 2022. – 42 p.
2. Price J. F. Lagrangian and Eulerian representations of fluid flow. – Woods Hole Oceanographic Institution, 2024.
3. Sperling L. H. Introduction to Physical Polymer Science. – Wiley, 2006. – 880 p.
4. Seiffert S. Physical Chemistry of Polymers: A Conceptual Introduction. – De Gruyter, 2020. – 217 p.
5. Синюк О., Поліщук О., Кунцов О. Моделювання процесу заповнення в'язкою рідиною порожнини прес-форми для лиття деталей взуття // Вісник ХНУ. – 2024. – № 3, Т. 1. – С. 472–479.
6. Синюк О. М., Кравчук О. А., Яшина О. М., Кравчук А. Ю. Розробка математичної моделі заповнення порожнини пресформи розплавом полімерного матеріалу з наповнювачем // Вісник ХНУ. – 2020. – № 2. – С. 195–200.
7. Синюк О. М., Скиба М. Є. Експериментальне дослідження процесу утворення спаїв та впливу орієнтації спаїв на експлуатаційні властивості полімерних виробів // Вісник ХНУ. – 2005. – № 4, Ч. 1, Т. 2. – С. 245–248.
8. Синюк О. М. Удосконалення прес-форм для лиття деталей взуття: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.10. – Хмельницький: ТУ Поділля, 2002. – 157 с.
9. Synyuk O. Numerical simulation of viscoprelie liquid flow with integral rheological law in flat or cylindrical channels // Computer Systems and Information Technologies. – 2020. – № 1. – P. 12–21.
10. Hadebe X. P., Tchomeni Kouejou B. X., Alugongo A. A., Sozinando D. F. Finite Element Analysis and Computational Fluid Dynamics for the Flow Control of a Non-Return Multi Door Reflux Valve // Fluids. – 2024. – Vol. 9, No. 10.
11. Muraro F., Dolcetti G., Nichols A., Tait S. J., Horoshenkov K. V. Free-surface behaviour of shallow turbulent flows // Journal of Hydraulic Research. – 2021. – Vol. 59, No. 1. – P. 20–35.
12. Dolcetti G., Horoshenkov K. V., Krynkin A., Tait S. J. Frequency-wavenumber spectrum of the free surface of shallow turbulent flows over a rough boundary // Physics of Fluids. – 2016. – Vol. 28, No. 10. – 105105.
13. Kulkarni V. M., Liang C. W., Tan C. W., Aswatha Narayana P. A., Seetharamu K. N. Simulation of Mold Filling for Non-Newtonian Fluids (Part 2) // JMEP. – 2006. – Vol. 3, No. 2. – P. 52–60.
14. Salinas C. H., Vasco D. A., Moraga N. O. Two-dimensional non-Newtonian fluid injection moulding filling improved with a CVFEM/VOF method // Blucher Mechanical Engineering Proceedings. – 2014. – Vol. 1, No. 1.
15. Sochi T. Variational Approach for Resolving the Flow of Generalized Newtonian Fluids in Circular Pipes and Plane Slits // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Article ID 714136.

16. Lynam C., Milani A. S. Guide to Modeling Thermoplastic Composite Manufacturing Processes: Optimizing Process Variables and Tooling Design Using Finite Element Analysis. – DEStech Publications, 2014. – 94 p.
17. Wang M.-L., Chang R.-Y., Hsu C.-H. Molding Simulation: Theory and Practice. – Hanser, 2022. – 532 p.
18. Kazmer D. O. Injection Mold Design Engineering. – 2nd ed. – Hanser Publications, 2016. – 529 p.
19. Cline D. Variational Principles in Classical Mechanics. – LibreTexts, 2024. – 717 p.

References

1. Feireisl E., Lukacova-Medvidova M., Schneide S. Approximating viscosity solutions of the Euler system. – 2022. – 42 p.
2. Price J. F. Lagrangian and Eulerian representations of fluid flow. – Woods Hole Oceanographic Institution, 2024.
3. Sperling L. H. Introduction to Physical Polymer Science. – Wiley, 2006. – 880 p.
4. Seiffert S. Physical Chemistry of Polymers: A Conceptual Introduction. – De Gruyter, 2020. – 217 p.
5. Syniuk O., Polishchuk O., Kuntsov O. Modeliuvannia protsesu zapovnennia viazkoiu ridynoiu porozhnyny pres-formy dlia lyttia detalei vzuttia // Visnyk KhNU. – 2024. – № 3, T. 1. – S. 472–479.
6. Syniuk O. M., Kravchuk O. A., Yashyna O. M., Kravchuk A. Yu. Rozrobka matematychnoi modeli zapovnennia porozhnyny presformy rozplavom polimernoho materialu z napovniuvachem // Visnyk KhNU. – 2020. – № 2. – S. 195–200.
7. Syniuk O. M., Skyba M. Ye. Eksperymentalne doslidzhennia protsesu utvorennia spaiv ta vplyvu oriantatsii spaiv na ekspluatatsiini vlastyvoli polimernykh vyrobiv // Visnyk KhNU. – 2005. – № 4, Ch. 1, T. 2. – S. 245–248.
8. Syniuk O. M. Udoskonalennia pres-form dlia lyttia detalei vzuttia: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.10. – Khmelnytskyi: TU Podillia, 2002. – 157 s.
9. Synyuk O. Numerical simulation of viscoprelc liquid flow with integral rheological law in flat or cylindrical channels // Computer Systems and Information Technologies. – 2020. – № 1. – P. 12–21.
10. Hadebe X. P., Tchomeni Kouejou B. X., Alugongo A. A., Sozinando D. F. Finite Element Analysis and Computational Fluid Dynamics for the Flow Control of a Non-Return Multi Door Reflux Valve // Fluids. – 2024. – Vol. 9, No. 10.
11. Muraro F., Dolcetti G., Nichols A., Tait S. J., Horoshenkov K. V. Free-surface behaviour of shallow turbulent flows // Journal of Hydraulic Research. – 2021. – Vol. 59, No. 1. – P. 20–35.
12. Dolcetti G., Horoshenkov K. V., Krynkina A., Tait S. J. Frequency-wavenumber spectrum of the free surface of shallow turbulent flows over a rough boundary // Physics of Fluids. – 2016. – Vol. 28, No. 10. – 105105.
13. Kulkarni V. M., Liang C. W., Tan C. W., Aswatha Narayana P. A., Seetharamu K. N. Simulation of Mold Filling for Non-Newtonian Fluids (Part 2) // JMEP. – 2006. – Vol. 3, No. 2. – P. 52–60.
14. Salinas C. H., Vasco D. A., Moraga N. O. Two-dimensional non-Newtonian fluid injection moulding filling improved with a CVFEM/VOF method // Blucher Mechanical Engineering Proceedings. – 2014. – Vol. 1, No. 1.
15. Sochi T. Variational Approach for Resolving the Flow of Generalized Newtonian Fluids in Circular Pipes and Plane Slits // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Article ID 714136.
16. Lynam C., Milani A. S. Guide to Modeling Thermoplastic Composite Manufacturing Processes: Optimizing Process Variables and Tooling Design Using Finite Element Analysis. – DEStech Publications, 2014. – 94 p.
17. Wang M.-L., Chang R.-Y., Hsu C.-H. Molding Simulation: Theory and Practice. – Hanser, 2022. – 532 p.
18. Kazmer D. O. Injection Mold Design Engineering. – 2nd ed. – Hanser Publications, 2016. – 529 p.
19. Cline D. Variational Principles in Classical Mechanics. – LibreTexts, 2024. – 717 p.