

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ РОЗПЛАВІВ ПОЛІМЕРІВ ЗА НАЯВНОСТІ НИЗЬКОВ'ЯЗКОГО ПРИСТІННОГО ШАРУ

Показано особливості пристінних ефектів в процесі 3D-друку. Отримані залежності розподілу швидкості полімеру та тиску в каналі від продуктивності при різних значеннях в'язкості полімеру в пристінному шарі, а також залежності в'язкості пристінного шару від швидкості руху та температури. Результати моделювання дозволяють уточнити результати розрахунків параметрів екструзії та інших процесів переробки полімерів.

Ключові слова: розплав, полімер, пристінний шар, моделювання, в'язкість.

© Сокольський О. Л., Івіцький І. І., Олексішен В. О., 2019

Постановка проблеми. Дослідження процесу руху полімерів в каналах переробного обладнання показали, що шар полімеру біля стінок каналу прогривається швидше і тому набуває відмінних від основної маси матеріалу властивостей – підвищеної температури, зниженої молекулярної маси, а відтак і зменшеної в'язкості [1]. Характер пристінного шару визначається низкою факторів: величиною пристінного тертя, швидкістю руху матеріалу, режимом нагрівання сировини. Подібні пристінні шари відрізняються від таких у звичайних низькомолекулярних рідинах [2], оскільки мають іншу природу.

Аналіз попередніх досліджень. В роботі [3] розглядається аналітичне розв'язання найпростішої задачі про розподіл швидкості в ламінарному приграничному шарі на пластині. Наближений розрахунок приграничного шару в круглій трубці був виконаний Шиллером [4]. Він припускав, що в приграничному шарі зміна швидкості відбувається по параболі, а в потенційній течії по прямій.

В роботі [5] Едмонсон і Феннер показали існування низьков'язкого шару розплаву, що знаходиться між основним шаром полімеру і осердям шнека, який з'являється в результаті плавлення пробки гранул за рахунок тепла, що надходить від шнека. Такий режим плавлення виникає за відсутності охолодження шнека.

В роботах [6, 7] автори наводять методики визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів, які можуть бути застосовані при визначенні характеристик матеріалу для використання у системах математичного моделювання. У роботах [8, 9] приділено увагу математичному моделюванню ковзання полімеру по стінці каналу переробного обладнання, при цьому вплив низьков'язкого пристінного шару зведений до коефіцієнту ковзання.

Аналіз наведених робіт показав, що за умови тонкого відносно основного потоку приграничного шару розподіл швидкостей в ньому можна вважати близьким до лінійного.

Метою статті є аналіз результатів математичного моделювання течії розплавів полімерів з імітацією наявності низьков'язкого пристінного шару.

Виклад основного матеріалу. Особливий інтерес представляє вивчення характеру течій полімеру з пристінним шаром в каналі головки пристрою для формування методом просторового друку (3D-принтер). За основу обрано пристрій, що працює за методом пошарового наплавлення форми майбутнього виробу (рис. 1). Канал робочого органу має зазвичай діаметр від 0,1 мм до 1,2 мм. За малих діаметрів сопла властивості полімеру по всьому об'єму каналу відповідають властивостям пристінного шару. Проте при зростанні діаметру сопла, полімерний матеріал стає більш холодним і в'язким ближче до центральної осі. Як показують дослідження, за діаметрів сопла 0,8 мм і вище, центральна частина матеріалу залишається нерозплавленою. Подача матеріалу відбувається за рахунок ковзання центрального нерозплавленого матеріалу по граничному шару з низькою в'язкістю. Причому збільшення потужності нагрівача призводить лише до ще більшого підвищення в'язкості граничного шару і навіть його підгоряння (рис. 2). При цьому осьова частина матеріалу лишається і надалі нерозплавленою. Можливий варіант зменшення швидкості подачі матеріалу в робочу зону. В такому випадку температурне поле по перерізу каналу порівняно вирівнюється, але це суттєво знизить швидкість формування виробу. Тому найбільш оптимальними є середні значення параметрів друку (температура, швидкість подачі, інтенсивність охолодження зони друку). За таких параметрів вихід полімеру з сопла формуючої головки проходить рівномірно та без ускладнень, що в свою чергу відображається на якості фінального виробу.

Перспективним є точне математичне моделювання та експериментальне дослідження параметрів друку, при яких якість виробів буде найвищою. Оптимально проводити дослідження каналів з діаметром 0,4 та 0,5 мм – для точного друку, та 1 мм - для грубого. Дані діаметри є найбільш розповсюдженими в сфері адитивних технологій. Особливо слід звернути увагу на течію в соплі діаметром 1 мм, так як полімери найбільш популярних типів в осьовій частині каналу залишаються непроплавленими. Якість друку для такого діаметру напряму залежить від тертя між граничним та внутрішнім шаром.

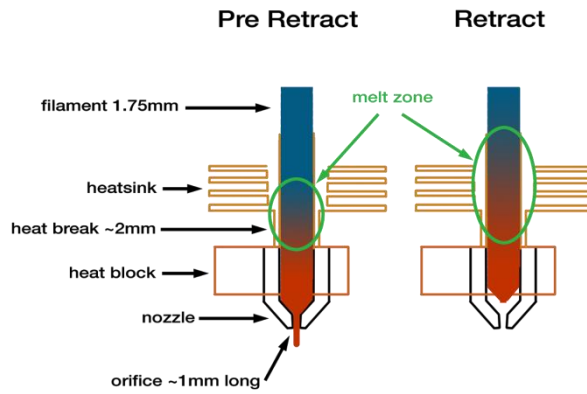


Рис. 1 – Метод пошарового наплавлення

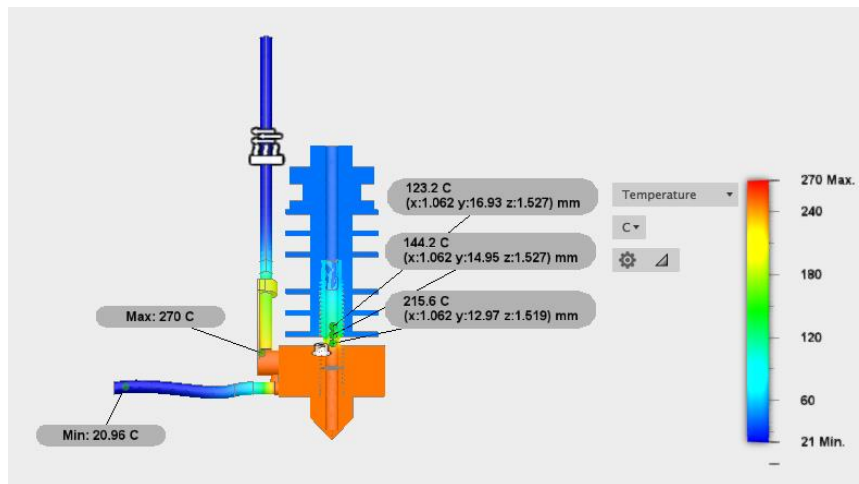
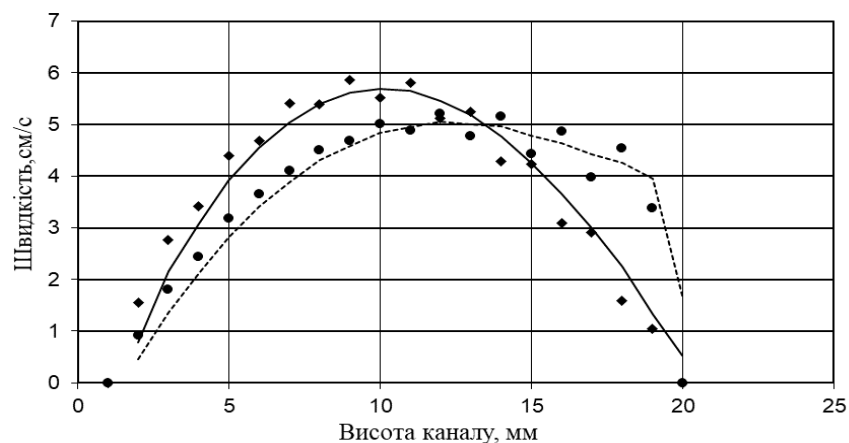


Рис. 2 – Температурне поле екструдера 3D-принтера

Особливістю проведених числових експериментів є те, що оскільки значення швидкості полімеру біля стінки заздалегідь не відома, замість неї введено умовний тонкий шар рідини, з властивостями, відмінними від властивостей основного матеріалу. Це моделює наявність низькомолекулярних фракцій в пристінному шарі полімеру, або застосування змащувальних домішок при екструзії.

Розрахунки проведено для геометрії каналу шнека екструдера. Для моделювання використовувалися властивості поліетилену високого тиску марки 15803-020 (ГОСТ 16337-77).

На рис. 3 зображено залежність розподілу швидкості рідини від наявності пристінного шару.

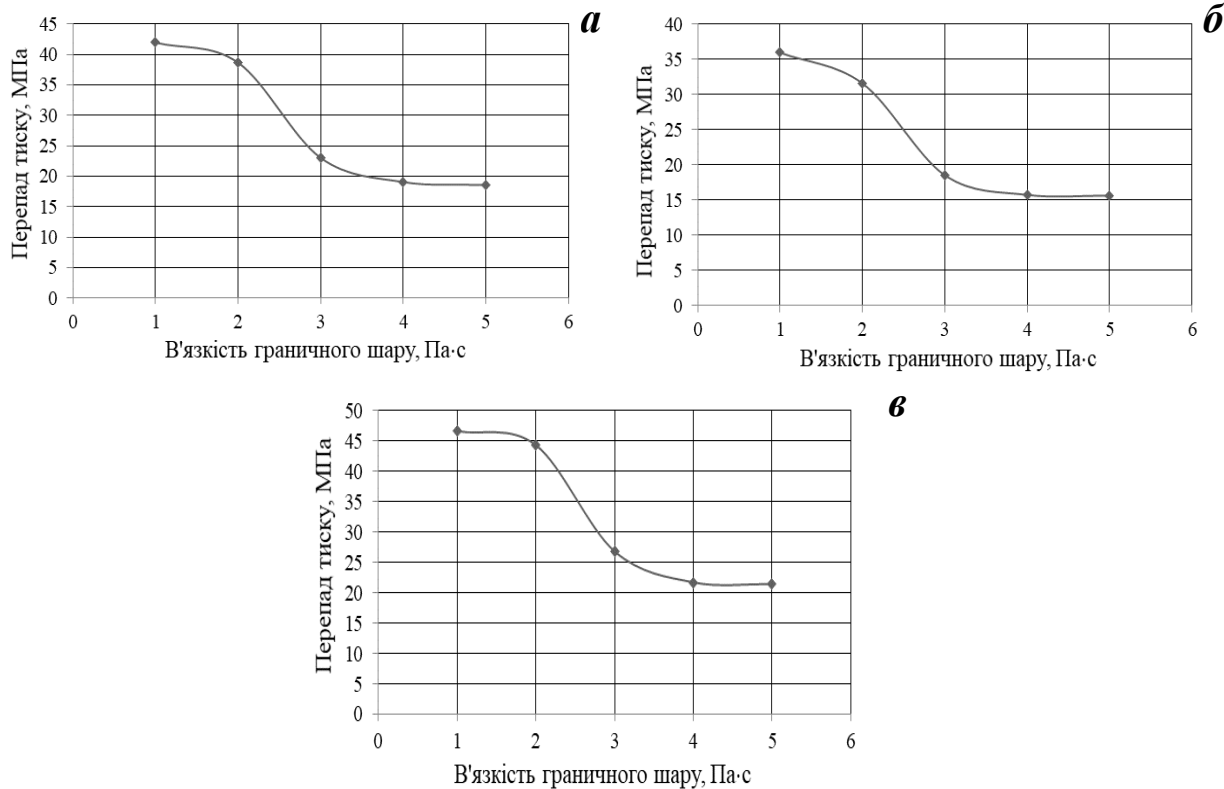


1 – монотечія, 2 – з пристінним шаром

Рис. 3 – Розподіл швидкостей по висоті каналу

Проаналізувавши отримані залежності, можна зробити висновок про те, що за наявності пристінного шару збільшується середня швидкість руху в каналі.

Також були отримані залежності зміни перепадів тиску від в'язкості пристінного шару, при різних значеннях продуктивності рідини, яка протікає крізь канал (рис. 4).

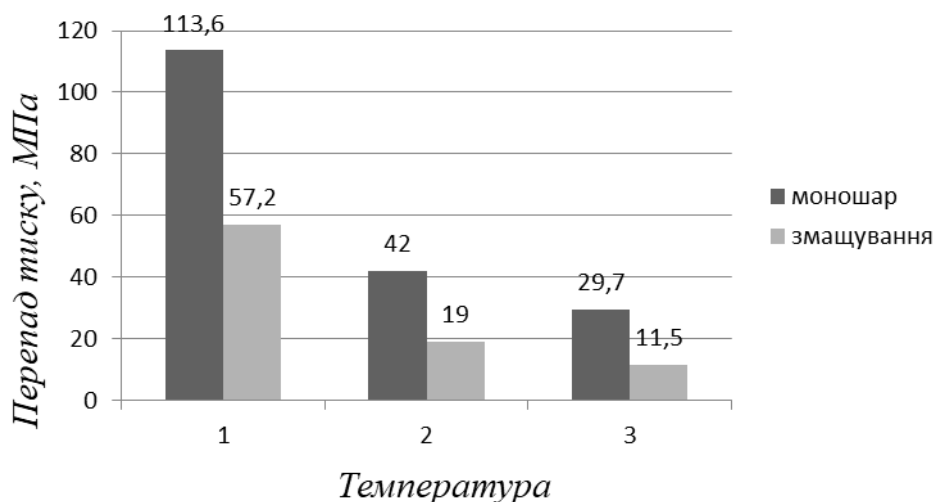


a – 40 кг/год, б – 60 кг/год, в – 80 кг/год

Рис. 4 – Залежність перепаду тиску від зміни в'язкості граничного шару при різних продуктивностях

Отже, з рис. 4 витікає, що тиск в каналі зростає при збільшенні в'язкості граничного шару, і досягає найбільшого значення при відсутності змащення стінок каналу. Також тиск зростає при збільшенні продуктивності.

Також досліджувалась залежність перепаду тиску в каналі від температури граничного шару для моношару та шару зі змащенням, за таких вихідних даних: продуктивність 60 кг/год, в'язкість пристінного шару $\mu=100$ Па·с при температурі $T=120^\circ\text{C}$. Результати досліджень показано на рис. 5.



1 – $T=120^\circ\text{C}$, 2 – $T=140^\circ\text{C}$, 3 – $T=160^\circ\text{C}$

Рис. 5 – Залежність перепаду тиску від температури

З цієї залежності ми бачимо, що зі збільшенням температури тиск падає як в каналі з моношаром полімеру, так і в каналі зі змащуванням, також можна побачити, що перепад тиску в каналі з моношаром помітно вищий.

Проведені числові експерименти дозволили змодельовати залежність між продуктивністю та перепадом тиску в каналі за наявності пристінного шару (рис. 6).

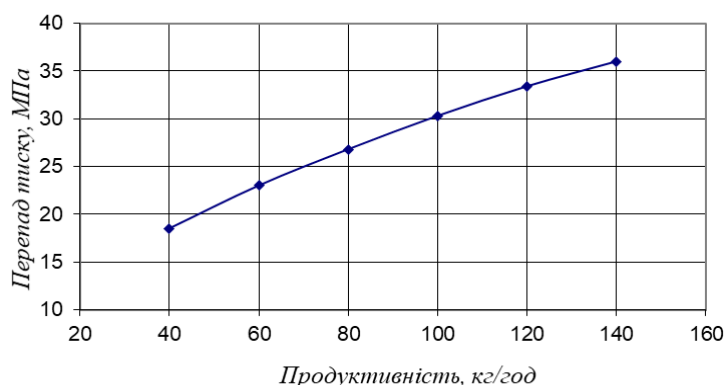


Рис. 6 – Залежність перепаду тиску від продуктивності

З залежності на рис. 4 можна встановити, що зі збільшенням продуктивності, тиск зростає за більш похилою нелінійною кривою, на відміну від такої залежності за відсутності пристінного шару. Тому введення змащувального пристінного шару збільшує продуктивність переробного обладнання.

Висновки. Отримані залежності розподілу параметрів течії полімеру в каналі від наявності та властивостей пристінного шару, а також залежності в'язкості пристінного шару від швидкості руху та температури. Результати моделювання дозволяють уточнити результати розрахунків параметрів екструзії, 3D-друку та інших процесів переробки полімерів, а також рекомендувати застосування змащувальних домішок для збільшення продуктивності й запобігання.

Перспективами подальших досліджень можуть бути моделювання течії з пристінним шаром розплавів з високоеластичними властивостями.

Список використаної літератури

1. Пугачевич П.П., Бегляров Е.М. Поверхностные явления в полимерах – М.: Химия, 1982. – 198 с.
2. Лойцянский Л.Г. Ламинарный пограничный слой – М.: «Физмат», 1962. – 479 с.
3. Кирпиков В.А., Шорин Г.Н. Введение в теорию пограничного слоя. Научное пособие. Под редакцией д-ра физ. наук, профессора Гухмана А.А. – М.: МИХМ, 1974. – 287 с.
4. Шиллер Г. Теория пограничного слоя – М.: «Наука», 1969. - 774 с.
5. Едмонсон І.Р., Феннер Р.Т. Полімерна інженерія, вип.. 16, 1975. – с.49-56.
6. Sokolskiy A.L., Ivitskiy I.I. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment. Modern Scientific Research and their Practical application. 2014. Vol. J21410 . P. 137—140.
7. Сокольський О.Л., Івіцький І.І., Сівецький В.І., Мікульюнок І.О. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2014. №2(94). С. 66—69.
8. Ivitskiy I.I. Polymer Wall Slip Modelling. Technology Audit and Production Reserves. 2014. Vol 5, N 3(19). P. 8—11.
9. Сокольський О.Л., Сівецький В.І., Мікульюнок І.О., Івіцький І.І. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні. Хімічна промисловість України. 2013. №6. С. 34—37.

Надійшла до редакції 26.12.2018

Sokolskiy O. L., Ivitskiy I. I., Oleksishen V. O.

MODELING OF POLYMER MELT FLOW WITH THE PRESENCE OF A LOW VISCOSITY NEAR-WALL LAYER

Investigation of polymers movement process in the channels of processing equipment showed that the polymer layer near channel walls warms up faster and therefore acquires different properties from the main mass of the material - increased temperature, low molecular weight, and then reduced viscosity. A number of factors determines the nature of the wall layer: the amount of wall friction, the speed of the material, the mode of heating of the raw material. Such near-wall layers differ from those of ordinary low-molecular liquids, since they have a different nature.

An analysis of these works showed that with a thin relative to the main flow of the boundary layer, the distribution of velocities in it can be considered close to linear. The purpose of the article is to analyze the results of mathematical modeling of the flow of polymer melts with imitation of the presence of low viscosity wall layer.

Of particular interest is the study of the nature of polymer flows with a wall layer in the channel of the head of the device for forming by the method of spatial printing (3D printer). A device based on the method of layer-by-layer surfacing of the shape of the future product is selected as the basis the channel of the working body usually has a diameter of from 0.1 mm to 1.2 mm. For small nozzle diameters, the polymer properties throughout the channel volume correspond to the properties of the near-wall layer. However, as the diameter of the nozzle increases, the polymeric material becomes cooler and more viscous closer to the central axis.

A feature of the conducted numerical experiments is that, since the value of the velocity of the polymer at the wall is not known in advance, instead of it, a conditional thin layer of liquid is introduced, with properties different from those of the base material. This simulates the presence of low molecular weight fractions in the surface layer of the polymer, or the use of lubricating impurities during extrusion.

It has been established that with an increase in productivity, the pressure increases along a flatter nonlinear curve, in contrast to this dependence in the absence of a near-wall layer. Therefore, the introduction of a lubricating wall layer increases the productivity of processing equipment.

The obtained dependences of the distribution of the flow parameters of the polymer in the channel on the presence and properties of the near-wall layer, as well as the dependence of the viscosity of the near-wall layer on the velocity and temperature. The simulation results help to clarify the results of calculations of the parameters of extrusion, 3D printing and other polymer processing processes, as well as recommend the use of lubricant additives to increase productivity and prevent.

Prospects for further research may be modeling flow with a wall of melts with highly elastic properties.

Keywords: melt, polymer, near-wall layer, modeling, viscosity.

References

1. Pugachevich P.P., Beglyarov E.M. Poverhnostnyie yavleniya v polimerah – M.: Himiya, 1982. – 198 p.
2. Loytsyanskiy L.G. Laminarnyy pogranchnyiy sloy - M.: «Fizmat», 1962. – 479 p.
3. Kirpikov V.A., Shorin G.N. Vvedenie v teoriyu pogranchnogo sloya. Nauchnoe posobie. Pod redaktsiey d-ra fiz. nauk, professora Guhmana A.A. – M.: MIHM, 1974. – 287 p.
4. Shiller G. Teoriya pogranchnogo sloya - M.: «Nauka», 1969. – 774 p.
5. Edmonson I.R., Fenner R.T. Polimerna inzheneriya, vip.. 16, 1975. – P. 49-56.
6. Sokolskiy A.L., Ivitskiy I.I. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment. Modern Scientific Research and their Practical application. 2014. Vol. J21410 . P. 137—140.
7. Sokolskiy O.L., Ivitskiy I.I., Sivetskiy V.I., Mikulonok I.O. Vznachennya v'yazkostI pristinnogo sharu u formuyuchih kanalah oblalnannya dlya pererobki polimeriv. Naukovi visti NTUU «KPI». 2014. №2(94). P. 66—69.
8. Ivitskiy I.I. Polymer Wall Slip Modelling. Technology Audit and Production Reserves. 2014. Vol 5, N 3(19). P. 8—11.
9. Sokolskiy O.L., Sivetskiy V.I., Mikulonok I.O., Ivitskiy I.I. Chislove modelyuvannya vplivu pristinnogo sharu na protses tehhii polimeru v pererobnomu oblalnanni. Himichna promislolist Ukraini. 2013. №6. P. 34—37.