

УДК 678.057

**СІВЕЦЬКИЙ В. І.**, к.т.н., проф.; **ІВІЦЬКИЙ І. І.**, к.т.н., доц.;  
**КУРИЛЕНКО В. М.**, аспірант; **ПОЛІЩУК О. В.**, магістрант

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВВЕДЕННЯ МІКРОВКЛЮЧЕНЬ У РОЗПЛАВ ПОЛІМЕРУ**

*Досліджено можливість отримувати полімерний виріб методом екструзії з одночасною інжекцією додаткової суміші полімеру з частинками, які імітують інтелектуальні датчики з заданим кроком і глибиною.*

**Ключові слова:** введення, інжекція, екструзія, інтелектуальний датчик, канал, глибина занурення

**DOI:** 10.20535/2306-1626.1.2018.143377

© Сівецький В. І., Івіцький І. І., Куриленко В. М., Поліщук О. В., 2018

**Вступ.** При моделюванні окремих стадій технологічного процесу формування екструзійних виробів із позиціонованим вживленням в них дрібних частинок робочі канали формуючого устаткування мають різноманітну геометрію, деформаційні і теплові режими. Все це взаємно пов'язано зі зміною реологічних властивостей перероблюваного матеріалу на стадіях пластикації та формування.

В силу складності і великого об'єму розрахунків при моделюванні процесів формування виробів складної геометрії, такі розрахунки нині виконуються за допомогою обчислювальної техніки та унікального програмного забезпечення на математичній базі методів скінченних елементів і контрольних об'ємів. Ці програмні продукти визначають пріоритет розробника в певній галузі і мають значну наукову і комерційну цінність.

Прогрес в різних областях техніки, і перш за все в авіакосмічній техніці, робототехніці, електроніці, медицині, пов'язаний з широким використанням наукоємних технологій і нових матеріалів. Одним з найважливіших напрямків розвитку цих сфер є розробка на основі досягнень наукоємних технологій матеріалів, здатних здійснювати моніторинг відповідальних деталей та вузлів, зокрема їх напружено-деформованого стану за допомогою введення у матеріал інтелектуальних датчиків, сигнали з яких у вигляді зміни електричного або магнітного поля змінюються під дією деформацій та напружень і зчитуються спеціальним обладнанням. При створенні таких матеріалів у їх структуру можливе введення не лише датчиків, а й актуаторів, які можуть вносити в структуру матеріалу зміни на основі сигналів, отриманих від датчиків [1].

**Аналіз досліджень.** Найбільш повно питання створення, виготовлення та застосування інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів розглянуто у праці [1]. В роботі [2] проводиться загальне порівняння полімерних композицій без інтелектуальних датчиків та з ними і розглядаються можливості їх застосування у різних сферах.

У дослідженнях [3, 4] наводяться приклади створення інтелектуальних полімерних систем на базі електроактивних датчиків, які дозволяють контролювати дію зовнішніх факторів на виріб, зокрема тиску, деформації, температури, тощо. Введення інтелектуальних датчиків у полімерний виріб дозволяє здійснювати моніторинг відповідальних деталей та вузлів в режимі реального часу в процесі їх експлуатації.

В роботах [5, 6] розглядається можливість використання інтелектуальних полімерних матеріалів у медицині, зокрема, для таких високовідповідальних застосувань, як протезування суглобів, штучні кардіоклапани та ін.

В [7] розглядається застосування інтелектуальних полімерних матеріалів у хімічній промисловості та медицині. За допомогою інтелектуальних датчиків можна здійснювати неруйнівний контроль і відслідковувати процеси формування, термоусадки, наприклад, з'єднувальних муфт з пам'яттю форми [8]. Автор розглядає можливість застосування інтелектуальних полімерних композицій для космічних апаратів, що дозволять покращити їх експлуатаційні характеристики.

Проте, автори вищезгаданих робіт приділяють значну увагу лише особливостям застосування готових виробів зовсім не зупиняючись на технології виробництва таких виробів. Таким чином, питання технології введення інтелектуальних датчиків у розплав полімерного композиційного матеріалу в процесах формування виробів є недостатньо вивченим.

**Метою даного дослідження** є аналіз можливостей позиціонованого введення інтелектуальних датчиків у полімерні вироби при їх екструзійному формуванні з застосуванням мікроінжекції.

### Результати числових досліджень

Враховуючи, що мікрровключення мають розміри набагато менші, ніж переріз каналу переробного обладнання, а при їх введенні використовується підготовлена полімерна суміш з твердими мікрровключеннями у вигляді інтелектуальних датчиків, розглядається спрощений варіант задачі до течії двох потоків розплаву полімеру.

Математичну модель ізотермічного змішування двох ламінарних потоків не ньютонівської рідини можна записати системою рівнянь, яка включає рівняння нерозривності, записаного для нестисливого середовища, нестационарне рівняння збереження кількості руху [9]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\nabla$  – оператор Гамільтона,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\mathbf{v}$  – вектор швидкості,  $\text{м/с}$ ;  $t$  – час,  $\text{с}$ ;  $\rho$  – густина,  $\text{кг/м}^3$ ;  $p$  – зовнішній гідростатичний тиск,  $\text{Па}$ ;  $\bar{\bar{\tau}} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{D}$  – тензором в'язких напружень другого рангу,  $\text{Па}$ ;  $\dot{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla)$  – тензор швидкості деформації,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\eta(\dot{\gamma})$  – в'язкість рідини як функція другого інваріанта  $\dot{\gamma}$  від  $\dot{D}$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}\dot{D} \cdot \dot{D}}$  – другий інваріант від  $\dot{D}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\bar{\bar{\tau}} : \nabla \mathbf{v}$  – член, що відповідає дисипації механічної енергії,  $\text{Вт/м}^3$ ;  $(:)$  – оператор подвійного скалярного добутку.

Енергетичний закон для в'язкості неньютонівської рідини має вигляд:

$$\eta(\dot{\gamma}) = K(\dot{\gamma})^{n-1} \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \quad (2)$$

де  $K$  – величина середньої в'язкості рідини,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\dot{\gamma}$  – другий інваріант  $\dot{D}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;  $n$  – показник ступеня, який визначає клас рідини;  $T$  – поточна абсолютна температура рідини,  $\text{К}$ ;  $T_0$  – абсолютна температура відліку,  $\text{К}$ .

Траєкторії руху твердих частинок визначаються інтегруванням за псевдо-часовими кроками рівняння балансу сил, що діють на частинку, записаного у Лагранжевій системі відліку.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho - \rho_p)}{\rho_p} \quad (3)$$

де  $u$  – вектор швидкості рідкого середовища,  $\text{м/с}$ ;  $u_p$  – вектор швидкості твердих частинок  $\text{м/с}$ ;

$F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24}$  – сила гідравлічного опору, віднесена до одиниці маси частинки,  $1/\text{с}$ ;  $C_D$  – безрозмірний

коефіцієнт гідравлічного опору;  $\rho_p$  – густина твердих частинок  $\text{кг/м}^3$ ,  $d_p$  – усереднений діаметр твердих

частинок,  $\text{м}$ ;  $\text{Re} = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}$  – число Рейнольдса.

За початкові умови системи рівнянь (2.1) приймаються розподіл полів компонент вектора швидкості  $\mathbf{V}_0$  і тиску  $p_0$  в момент часу  $t = 0$ :

$$\begin{cases} v(x, y, z) = v_0; \\ p(x, y, z) = p_0, \end{cases} \quad (4)$$

де  $(x, y, z) \in \Omega$  – декартові координати,  $\text{м}$ ;  $\Omega$  – розрахункова область.

Граничні умови для (1) включають:

- у вхідному січненні каналів задаються нормальні компоненти швидкості або масові витрати матеріалу:

$$n \cdot v = v_{inlet}(t); \quad \forall G = G_{inlet}(t), \quad (5)$$

де  $n$  – вектор зовнішньої нормалі до поверхні вхідного січення каналу;  $v_{inlet}, G_{inlet}$  – швидкість (м/с) та масова витрата (кг/с) у вхідному січенні каналу, відповідно;  $\forall$  – логічне «або»;

– у вихідному січенні каналу – нульовий градієнт тиску

$$n \cdot \nabla p = 0; \quad (6)$$

– на поверхнях контакту рідини зі стінками каналу задаються, або пристінні зсувні напруження у формі узагальненого закону Нав'є (граничних умов Нав'є, що являють собою рівняння рівноваги сил, які діють на поверхні контакту між двома середовищами), або умови прилипання:

$$\tau_{w \text{ sh str}} = -F_{slip} (v_{wt} - v_{tt}) \forall v = 0 \quad (7)$$

де  $\tau_{w \text{ sh str}} = (\bar{\tau} \cdot n) \cdot t$  – компонента тангенціального напруження у пристінному шарі, Па;  $n, t$  – одиничні нормальний і тангенціальний вектори до поверхні каналу;  $v_w, v_t$  – вектори результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу, м/с;  $v_{wt}, v_{tt}$  – тангенціальні компоненти векторів результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу, м/с;  $F_{slip}$  – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Для числової реалізації сформульованої задачі використано програмний продукт ANSYS Fluent, який побудовано на базі методу скінченних об'ємів.

Моделювання проводилось для поліетилену низького тиску, поліетилену високого тиску, поліпропілену.

На рис. 1 зображено скінченно-елементну модель каналу, в якому відбувається процес [10].

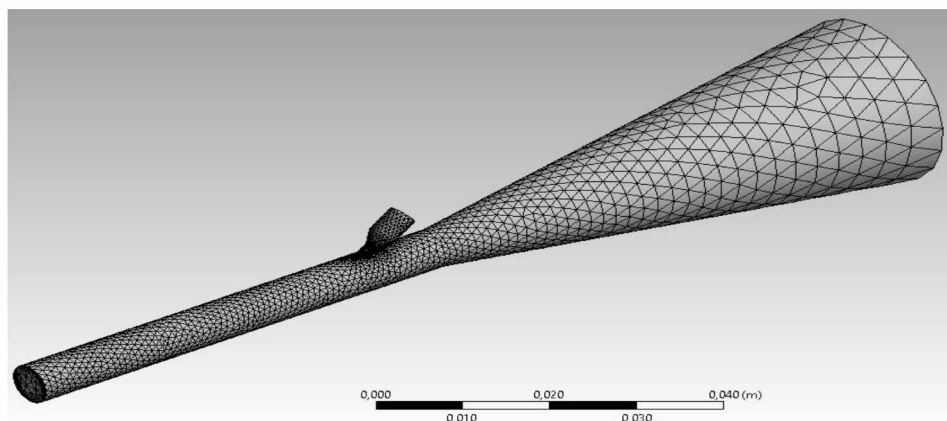


Рис. 1 – Скінченно-елементна модель каналу

Моделювання проводилося у внутрішньому каналі формуючої головки, у який за допомогою інжекційного механізму вводилися суміш частинок з досліджуваним матеріалом в основний потік, з метою регулювання глибини занурення та відстеження частинок в полімерному розплаві [11-18].

Кількість скінченних елементів, на які необхідно розбити дослідні об'єкти, визначалась порівнянням розрахункових швидкостей полімеру при розрахунках з різною густиною сітки. Достатньою вважалася кількість скінченних елементів, за якої величини швидкостей відрізнялись від отриманих на сітці меншої густини, не більш ніж на 1%.

Результати моделювання розподілу напружень всередині основного екструзійного та інжекційного каналів при різних співвідношеннях їх швидкостей показано на рис. 2.

Як видно з рис. 2, при збільшенні швидкості інжекції величина напружень у ділянці каналу, що розташована безпосередньо після зони інжекції додаткового потоку, збільшується.

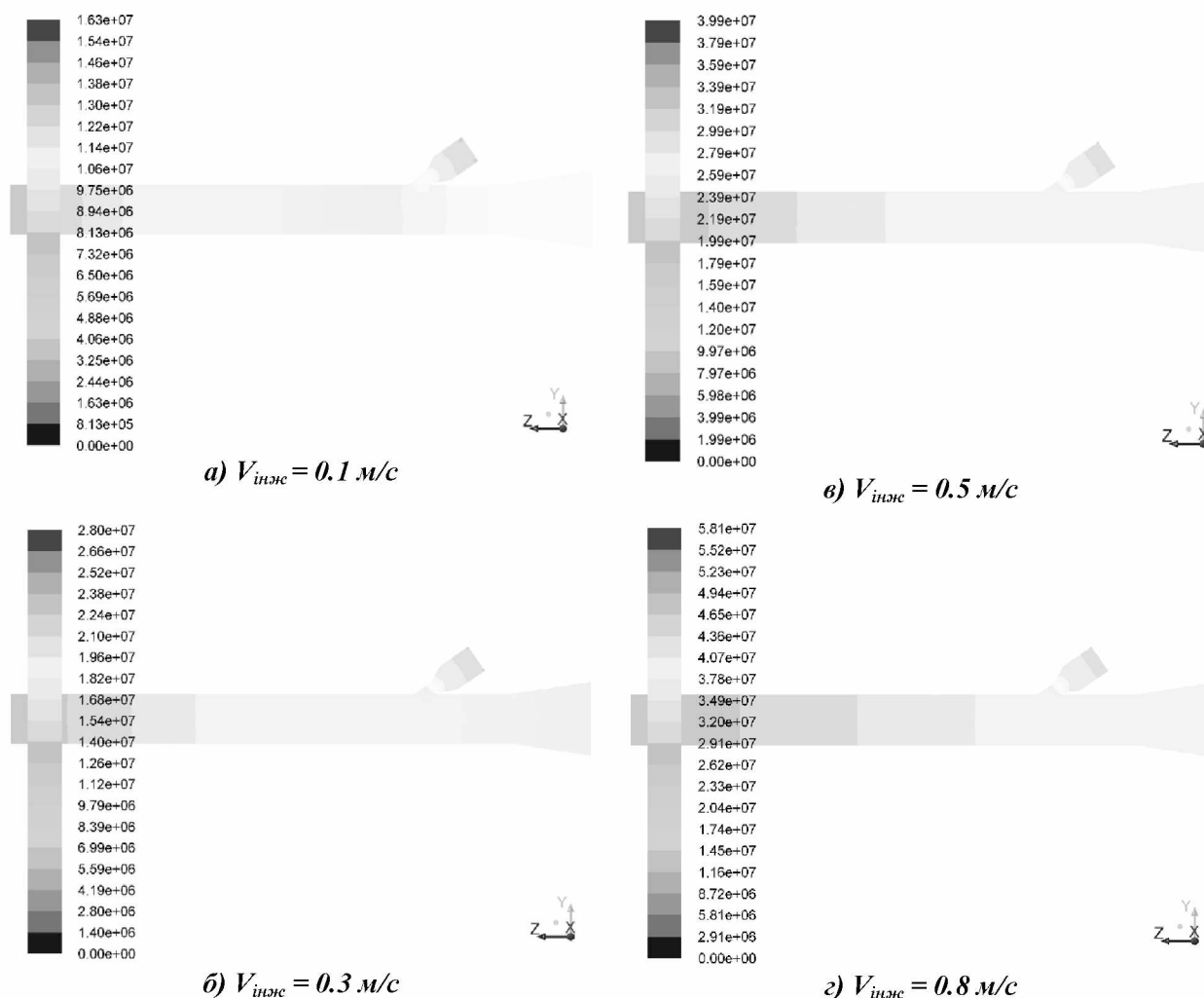


Рис. 2 – Розподіл напружень всередині основного екструзійного та інжекційного каналів при різних вхідних швидкостях потоку в інжекційному каналі

Результати моделювання розподілу швидкостей всередині основного екструзійного та інжекційного каналів при різних співвідношеннях їх швидкостей показано на рис. 3.

Як видно з рис. 3, при збільшенні швидкості інжекції швидкість загального потоку змінюється незначно, в зв'язку з великою різницею об'ємів основного та додаткового потоків.

Результати моделювання глибини занурення та траєкторії руху інжектowanego потоку в основному екструдованому при різних співвідношеннях їх швидкостей показано на рис. 4.

Як видно з рис. 4, при збільшенні швидкості інжекції траєкторія руху інжектowanego полімеру має значно більший розподіл за площею поперечного перетину. Це призводить до ускладнення у точному позиціонуванні мікровключень при виробництві функціональних матеріалів.

#### Висновки

Моделювання показало, що завдяки зміні параметрів процесів екструзії та інжекції досягається можливість регулювати глибину занурення цих потоків та траєкторії руху додаткового потоку в основному. Крім того, виявлені можливі ускладнення при точному позиціонуванні мікровключень при виробництві функціональних матеріалів.

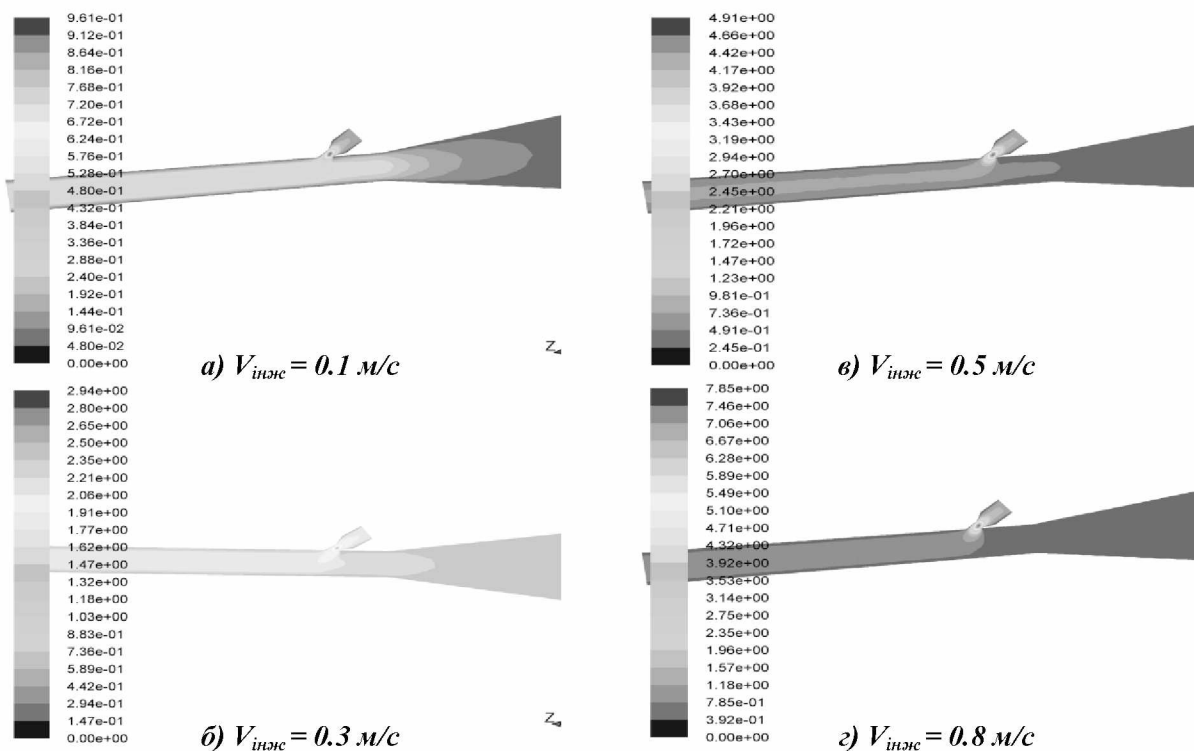


Рис. 3 – Розподіл швидкостей руху матеріалу при різних вхідних швидкостях потоку в інжекційному каналі

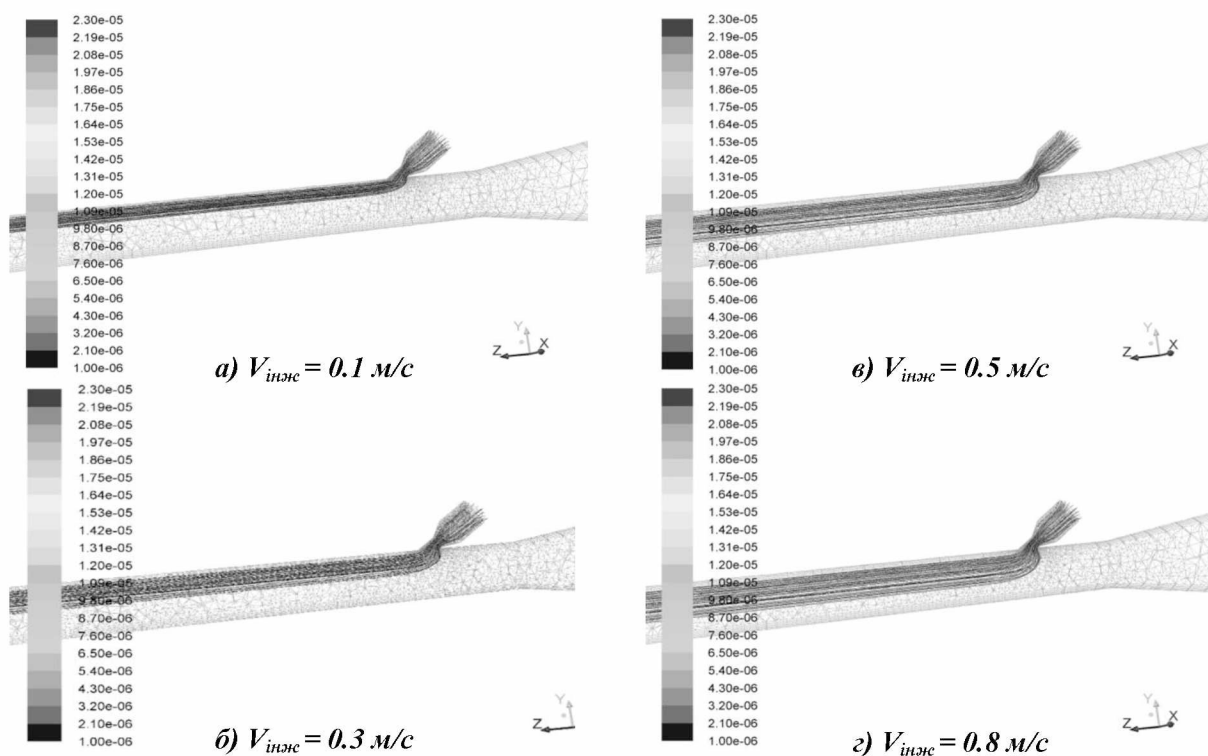


Рис. 4 – Візуальне зображення глибини занурення та траєкторії руху інжектваного потоку полімеру в основний екструдований потік при зміні швидкості інжектваного потоку

**Список використаної літератури**

1. Михайлин, Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю. А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 660 с.
2. Wallace, G. G. Intelligent polymer systems-concepts, approaches present uses and potential applications [Text] / G. G. Wallace // Material Forum. — 1992. — Vol. 16, № 2. — P. 111–115.
3. Wallace, G. G. Conductive Electroactive Polymers: Intelligent Polymer Systems [Text] / G. G. Wallace, P. R. Teasdale, G. M. Spinks, L. A. Kane-Maguire. — Ed. 3. — Northwest: CRC Press, 2008. — 263 p. doi:10.1201/9781420067156.
4. Barisci, J. N. Conducting polymer sensors [Text] / J. N. Barisci, C. Conn, G. G. Wallace // Trends in Polymer Science. — 1996. — Vol. 4, № 9. — P. 307–311.
5. Carpi, F. Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators [Text] / F. Carpi, E. Smela. — Chichester: Wiley, 2009. — 496 p. doi:10.1002/9780470744697
6. Hoffman, A. S. «Intelligent» polymers in medicine and biotechnology [Text] / A. S. Hoffman // Macromolecular Symposia. — 1995. — Vol. 98, № 1. — P. 645–664. doi:10.1002/masy.19950980156
7. Honeychurch, K. C. Nanosensors for Chemical and Biological Applications [Text] / K. C. Honeychurch. — Birmingham: Woodhead Publishing, 2014. — 372 p. doi:10.1016/b978-0-85709-660-9.50014-x
8. Kolosov A. E. Effective hardware for connection and repair of polyethylene pipelines using ultrasonic modification and heat shrinkage. Part 2. Production bases for molding of epoxy repair couplings with shape memory [Text] / A. E. Kolosov, O. S. Sakharov, V. I. Sivetskii, D. E. Sidorov, S. O. Pristailov // Chemical and Petroleum Engineering. — 2011. — Vol. 47, № 3–4. — P. 210–215. doi:10.1007/s10556-011-9448-4
9. Карвацький А. Я. Механіка суцільних середовищ [Електронний ресурс]: навч. посіб. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 290 с.
10. Сайт: ANSYS. ANSYS Fluent Tutorial Guide // Режим доступу : [www.ansys.com/](http://www.ansys.com/).
11. Івницький І. І. Моделювання введення інтелектуальних датчиків у розплав полімерного композиційного матеріалу [Текст] / І. І. Івницький, О. Л. Сокольський, В. М. Куриленко // Технологічний аудит та резерви виробництва. — 2016. — №5/3(31). — С. 22–26.
12. Ivitskiy I. Modeling the Electrostatic Control Over Depth of the Introduction of Intelligent Sensors into a Polymer Composite Material / I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, D. Ivitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2017. — Vol 1, N 5(85) . — P. 4–9. Doi: 10.15587/1729-4061.2017.91659
13. Сокольський О. Л. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів / О. Л. Сокольський, І. І. Івницький, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2014. — №2(94). — С. 66–69.
14. Сокольський О. Л. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, І. І. Івницький // Хімічна промисловість України. — 2013. — №6. — С. 34–37.
15. Ivitskiy I. I. Polymer Wall Slip Modelling / I. I. Ivitskiy // Technology Audit and Production Reserves. — 2014. — Vol 5, N 3(19). — P. 8–11. Doi: 10.15587/2312-8372.2014.27927.
16. Sokolskiy A. L. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment / A. L. Sokolskiy, I. I. Ivitskiy // Modern Scientific Research and their Practical application. — 2014. — Vol. J21410 . — P. 137–140.

Надійшла до редакції 03.06.2018

---

*Sivetskiy V. I., Ivitskiy I. I., Kurylenko V. M., Polishchuk O. V.*

**MODELING OF THE MICROINCLUSIONS INJECTION IN POLYMER MELT PROCESS**

*Purpose of the study is obtaining dependencies of the parameters of the process of introducing a polymer mixture with micro sensors to a certain depth and given coordinates of the finished product. Object of the study is the process of formation of polymer products with the introduction of intelligent sensors. Research subject is technological parameters of processes of extrusion-injection molding of polymer products from the positioning of intelligent sensors. The relevance of the study - analysis of the properties of intelligent polymer materials and the expediency of using intelligent sensors in the industry in the manufacture of polymer products showed a small degree of study of this issue. Here we note that the possibility of embedding in the structure of polymeric materials of elements capable of responding to changes in force, temperature and other environmental parameters allows modeling a wide range of innovative "intelligent" materials. "Intelligent" materials are able to adequately respond*

to new loads, change their characteristics and form, as well as independently regulate the degree of their response to new conditions in accordance with the level of their change. Intelligent sensors allow you to monitor the processes that occur during the formation of products from "intelligent" PCMs, as well as "monitor" their condition during operation and adequately respond to changes occurring in them, due to environmental factors. The results of the study - the data available in the literature on the motion of solid particles in the fluid in the channels of process equipment cannot be used without additional analysis and calculations in different conditions of technological processes. To fulfill the task, the experimental-theoretical approach and the method of investigation were used. The obtained parametric dependences of the process of forming extrusion products from the positioned injection of microporations of a mixture of polymer with solid microparticles for materials: low pressure polyethylene of grade 15313-003, high-pressure polyethylene of mark 15803-020 and polypropylene of grade 2248-002. Certain reliability of obtaining experimental data. The relative error does not exceed 10 %. The geometric parameters of the channels and the angle of inclination of the injection mechanism are established, at which the introduction of a polymer melt with microparticles at the specified depth of immersion in the article is achieved as precisely as possible. This work may be useful in the study, design and production of equipment for the processing of polymeric materials and the receipt of products made of polymeric and composite materials.

**Keywords:** introduction, injection, extrusion, intelligent sensor, channel, depth of immersion.

### References

1. Mykhailyn, Ya. A. (2008). Spetsyalnye polymernye kompozytsionnye materyaly [Special polymeric composite materials] Nauchnye osnovy y tekhnolohyy, 660 p.
2. Wallace, G. G. Intelligent polymer systems-concepts, approaches present uses and potential applications [Text] / G. G. Wallace // Material Forum. — 1992. — Vol. 16, № 2. — P. 111–115.
3. Wallace, G. G. Conductive Electroactive Polymers: Intelligent Polymer Systems [Text] / G. G. Wallace, P. R. Teasdale, G. M. Spinks, L. A. Kane-Maguire. — Ed. 3. — Northwest: CRC Press, 2008. — 263 p. doi:10.1201/9781420067156.
4. Barisci, J. N. Conducting polymer sensors [Text] / J. N. Barisci, C. Conn, G. G. Wallace // Trends in Polymer Science. — 1996. — Vol. 4, № 9. — P. 307–311.
5. Carpi, F. Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators [Text] / F. Carpi, E. Smela. — Chichester: Wiley, 2009. — 496 p. doi:10.1002/9780470744697
6. Hoffman, A. S. «Intelligent» polymers in medicine and biotechnology [Text] / A. S. Hoffman // Macromolecular Symposia. — 1995. — Vol. 98, № 1. — P. 645–664. doi:10.1002/masy.19950980156
7. Honeychurch, K. C. Nanosensors for Chemical and Biological Applications [Text] / K. C. Honeychurch. — Birmingham: Woodhead Publishing, 2014. — 372 p. doi:10.1016/b978-0-85709-660-9.50014-x
8. Kolosov A. E. Effective hardware for connection and repair of polyethylene pipelines using ultrasonic modification and heat shrinkage. Part 2. Production bases for molding of epoxy repair couplings with shape memory [Text] / A. E. Kolosov, O. S. Sakharov, V. I. Sivetskiy, D. E. Sidorov, S. O. Pristailov // Chemical and Petroleum Engineering. — 2011. — Vol. 47, № 3–4. — P. 210–215. doi:10.1007/s10556-011-9448-4
9. Karvatskiy A. Ya. Mechanics of Continuous Media [Electronic resource]: Teach. manual - K. : KPI them. Igor Sikorskiy, 2016. - 290 c.
10. Website: ANSYS. ANSYS Fluent Tutorial Guide // Access Mode: [www.ansys.com/](http://www.ansys.com/).
11. Ivitskiy I.I., Sokolskiy O.L., Kurilenko V.M. Simulation of Intelligent Sensors Dipping Into the Melting Polymer Composite. Technology Audit and Production Reserves. 2016. Vol. 5. N 3(31). P. 22–26. Doi: 10.15587/2312-8372.2016.81236.
12. Ivitskiy I., Sivetskiy V., Bazhenov V., Ivitska D. Modeling the Electrostatic Control Over Depth of the Introduction of Intelligent Sensors into a Polymer Composite Material. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 1, N 5(85). P. 4–9. Doi: 10.15587/1729-4061.2017.91659
13. Sokolskiy O.L., Ivitskiy I.I., Sivetskiy V.I., Mikulionok I.O. Vyznachennya vyzkosti prystinnoho sharu u formuyuchykh kanalakh obladnannya dlya pererobky polimeriv. Naukovi visti NTUU «KPI». 2014. № 2(94). S. 66–69.
14. Sokolskiy O.L., Sivetskiy V.I., Mikulionok I.O., Ivitskiy I.I. Chyslove modelyuvannya vplyvu prystinnoho sharu na protses techiy polimeru v pererobnomu obladnanmi. Khimichna promyslovist Ukrayiny. 2013. № 6. S. 34–37.
15. Ivitskiy I.I. Polymer Wall Slip Modelling. Technology Audit and Production Reserves. 2014. Vol. 5. N 3(19). P. 8–11. Doi: 10.15587/2312-8372.2014.27927.
16. 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.