



УДК 678.057

**EXTRUSION-INJECTING FORMATION OF INTELLIGENT  
POLYMERN PRODUCTS****ЕКСТРУЗІЙНО-ІНЖЕКЦІЙНЕ ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ  
ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ****Sivetskyi V. I./Сівецький В.І.***c.t.s., prof. / к.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001-8402-0874

**Sokolskyi O. L./Сокольський О.Л.***c.t.s., assoc. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-7929-3576

**Ivitskyi I. I./Івіцький І.І.***PhD, assoc. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-9749-6414

**Kurylenko V. M./Куриленко В.М.***postgraduate*

ORCID: 0000-0002-1606-5007

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Polytechnic Institute», Kyiv, Prosp.**Peremohy 37, 03056**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені**Ігоря Сікорського», Київ, просп. Перемоги 37, 03056*

**Анотація.** Проведено дослідження процесу екструзійно-інжекційного формування полімерних виробів. Моделювання проводилося у внутрішньому каналі формуючої головки, у який за допомогою інжекційного механізму вводилися суміш частинок з досліджуванним матеріалом в основний потік, з метою регулювання глибини занурення та відстеження частинок в полімерному розплаві. Числові експерименти здійснювались при різних кутах нахилу інжекційного механізму, а саме: від  $10^\circ$  до  $90^\circ$ , при цьому змінювались швидкості основного екструзійного потоку і, відповідно, швидкості впорскування суміші частинок з досліджуванним матеріалом.

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

**Постановка проблеми.**

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 виготовлення матеріалів та деталей здатних здійснювати моніторинг свого напружено-деформованого стану за допомогою позиціонованого введення у процесі формування інтелектуальних датчиків. Створення «інтелектуальних виробів» на базі полімерних композиційних матеріалів відкриває принципово нові можливості розробки сучасної техніки. Це дозволяє експлуатувати цю техніку при критичних навантаженнях та в умовах, коли ніякі інші методи контролю стану полімерного матеріалу і корегуючого впливу на нього не можуть бути використані за конструктивно-технологічних причин. Задача полягає в забезпеченні позиціонованого введення в структуру відповідальних деталей інтелектуальних датчиків, які будуть сигналізувати про зміни



напружено-деформованого стану виробу, температури тощо [1].

### **Аналіз попередніх досліджень формування інтелектуальних полімерних виробів.**

Існує багато робіт, які присвячені питанню вивчення екструзійного та інжекційного формування полімерних виробів [2-9]. Проте, автори даних робіт в більшості випадків приділяють свою увагу окремо кожному із способів.

Питання створення, виготовлення та застосування інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів та деталей розглянуто у праці [2].

В [3] наведені загальні порівняння полімерних композицій без та з інтелектуальними датчиками, де автори роблять висновки про можливість їх застосування у різних сферах.

Роботи [4, 5] присвячені принципам створення інтелектуальних полімерних систем на базі електроактивних датчиків, які дозволяють контролювати дію зовнішніх факторів на виріб, зокрема тиску, деформації, температури, тощо. Завдяки цьому можна здійснювати моніторинг відповідальних деталей та вузлів в режимі реального часу.

В [6, 7] описано використання інтелектуальних полімерних матеріалів у медицині, зокрема, для протезування суглобів, штучних кардіоклапанів та ін.

Праця [8] присвячена застосуванню інтелектуальних полімерних матеріалів у хімічній промисловості та медицині, де розглядаються особливості їх використання.

Авторами [9] розглядається можливість застосування інтелектуальних полімерних композицій для космічних апаратів, що дозволять покращити їх експлуатаційні характеристики. Полімерні вироби, у внутрішній структурі яких вживлені інтелектуальні датчики можуть здійснювати безперервний неруйнівний контроль напружено-деформованого стану.

В роботі [10] наведені результати першого числового моделювання процесу введення інтелектуальних датчиків у розплав полімерного композиційного матеріалу під час екструзії.

Слід зазначити, що авторами [11-15] проводяться дослідження у галузі створення інтелектуальних композиційних матеріалів.

**Метою** досліджень є числового та експериментальне моделювання процесу введення суміші полімеру з мікродатчиками на певну глибину та задані координати погонажного виробу.

### **Математична модель формування інтелектуальних полімерних виробів.**

Математичну модель ізотермічного злиття двох ламінарних потоків не ньютонівської рідини в зоні їх перехрещення під різними кутами та швидкостями можна записати системою рівнянь, яка включає рівняння нерозривності, записаного для нестисливого середовища, нестационарне рівняння збереження кількості руху [9]:

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



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

Енергетичний закон для в'язкості ньютонівської 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 мікрочастинок 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,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $u_p$  – вектор швидкості твердих частинок  $\text{м}/\text{с}$ ;  $F_D$  – сила гідравлічного опору, віднесена до одиниці маси частинки,  $1/\text{с}$ ;  $C_D$  – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору;  $\rho_p$  – густина твердих частинок  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $d_p$  – усереднений діаметр твердих частинок,  $\text{м}$ ;  $\text{Re}$  – 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 січенні каналів задаються нормальні компоненти швидкості або масові витрати матеріалу:

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

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

- у вихідному січенні каналу – нульовий градієнт тиску

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

- на поверхнях контакту рідини зі стінками каналу задаються умови прилипання,  $\mathbf{v} = 0$ .

### Числове моделювання формування інтелектуальних полімерних виробів.

Розрахункова модель включає канал з основним полімером, під кутом до

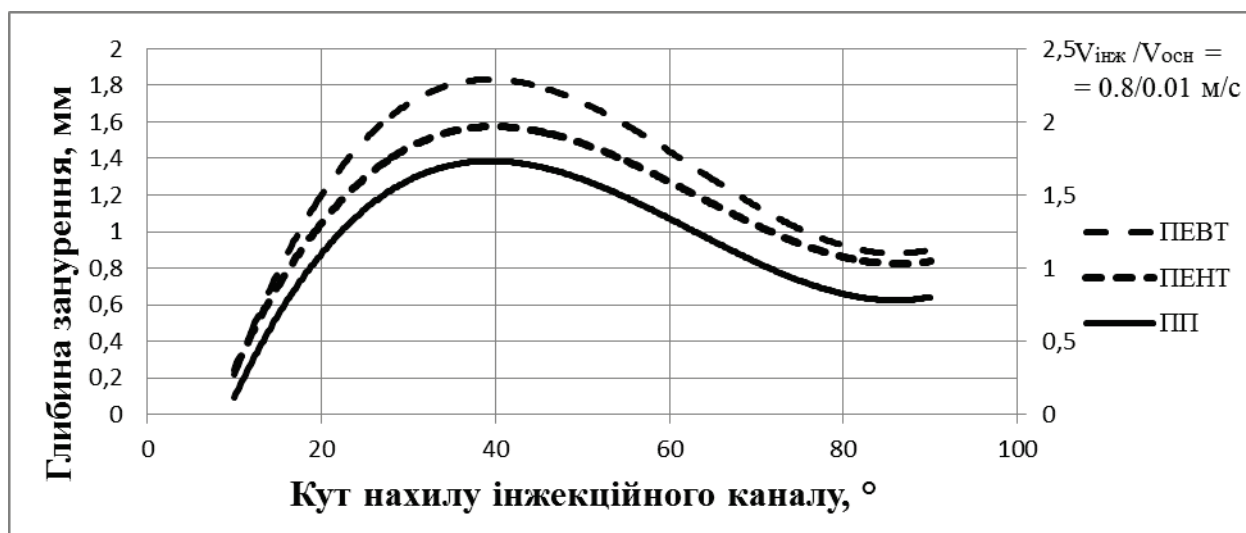


якого під'єднано канал для інжекції суміші того ж полімеру з мікрочастинками. Результати числового моделювання впливу кута нахилу інжекційного потоку відносно основного екструзійного каналу та співвідношення швидкостей руху полімеру в них представлено на рис. 1, 2.

При зміні кута нахилу потоку в інжекційному каналі відносно напрямку основного потоку полімеру в екструзійному каналі глибина занурення збільшується і досягає максимальних значень при куті  $35^\circ$ , рис.1.

Змінюючи швидкість подачі ПМ в інжекційному каналі або відношення швидкості інжекційного потоку до основного, можливо регулювати глибину занурення частинок для різних видів ПМ в основний потік екструзії, рис. 2. Зі збільшенням швидкості подачі ПМ в інжекційному каналі, глибина занурення частинок вздовж осі формуючого каналу збільшується поетапно.

При різних відношеннях швидкості інжекційного потоку до основного, а саме при їх збільшенні спостерігається поступове збільшення глибини занурення частинок вздовж осі формуючого каналу, в даному випадку для матеріалів марки ПЕНТ, ПЕВТ, ПП.



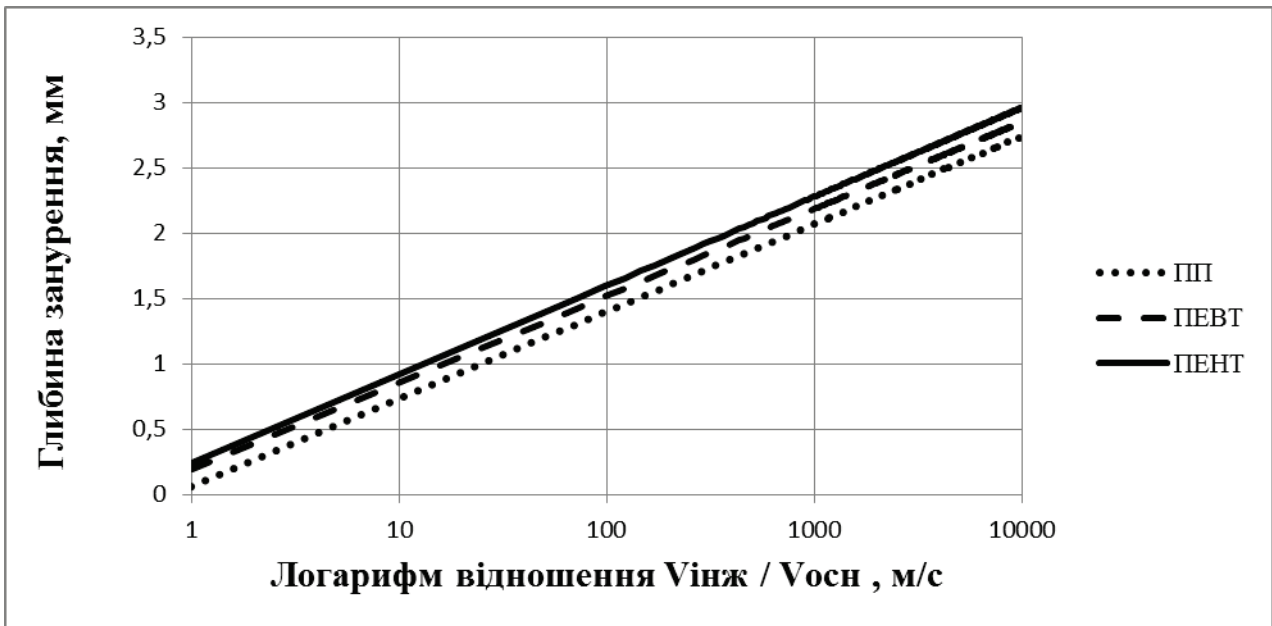
**Рис. 1. Усереднена глибина занурення частинок вздовж осі формуючого каналу за різних кутів нахилу інжекційного каналу**

Візуалізація злиття двох потоків при різних швидкостях вприску інжекційного пристрою та траєкторія їх руху показана на рис. 3.

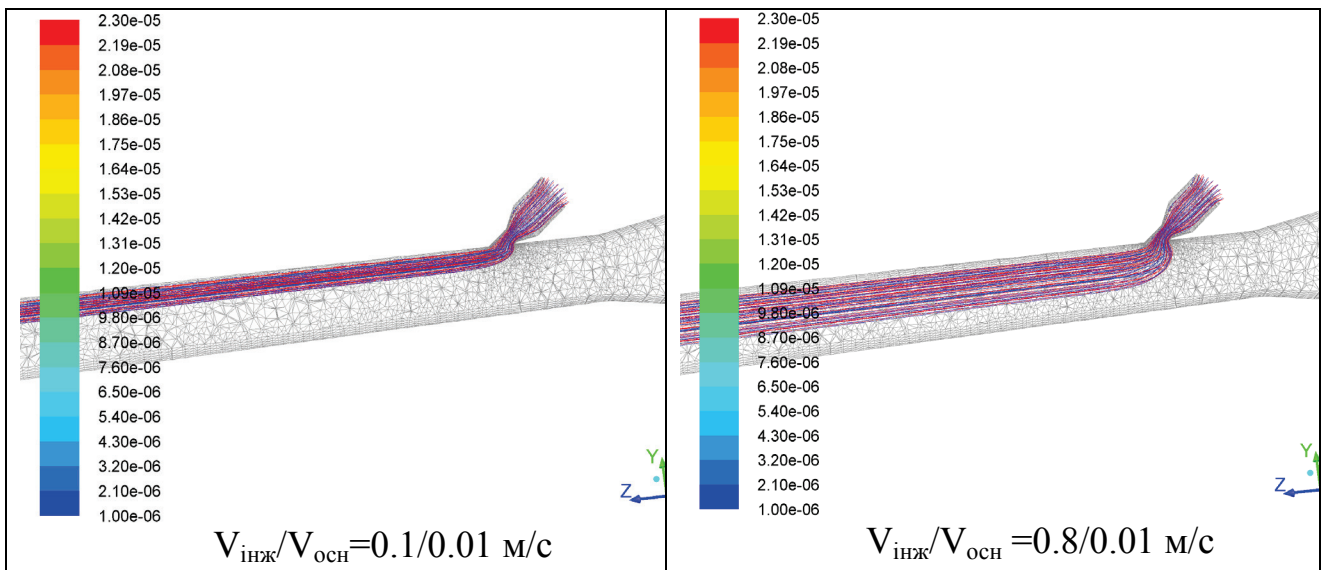
Глибина занурення частинок у полімерний матеріал суттєво залежить від швидкості інжекції, рис. 3. При збільшенні швидкості в інжекційному каналі глибина занурення інжектovanого «струменю» в основний екструзійний потік збільшується.

**Експериментальні дослідження формування інтелектуальних полімерних виробів.**

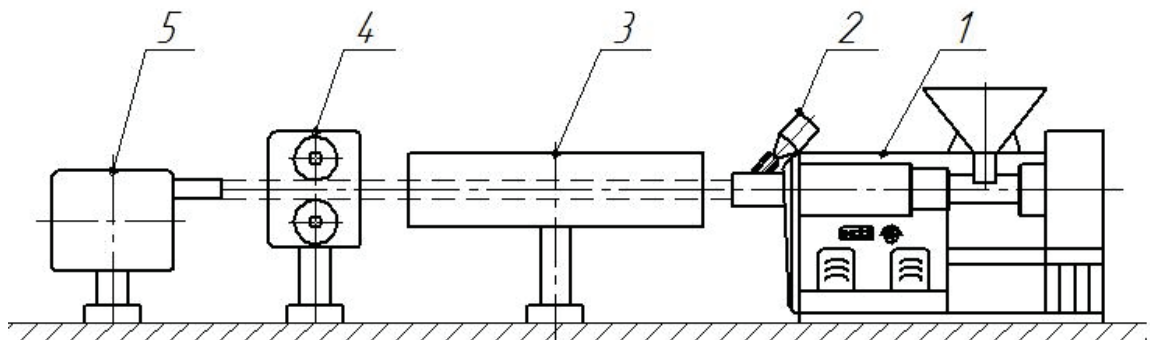
Для експериментальної перевірки результатів числового моделювання проводились дослідження на базі черв'ячного преса ЧП 32x20, оснащеного інжекційним пристроєм рис. 4.



**Рис. 2. Усереднена глибина занурення частинок вздовж осі формуючого каналу при різних відношеннях швидкості інжекційного потоку до основного**



**Рис. 3. Візуалізація злиття двох потоків полімеру**



**Рис. 4. Схема експериментальної установки**  
 1 – черв'ячний прес ЧП 32x20; 2 - інжекційний пристрій; 3 - ванна охолодження; 4, 5 – тягучий та відрізний пристрої



В ході експерименту було проведено ряд дослідів з різними полімерними матеріалами при різних швидкостях інжекційного та екструзійного потоку і при різних кутах нахилу інжекційного пристрою.

а) поліетилен низького тиску марки LDPE RTP 700 A;

б) поліетилен високого тиску марки high density polyethylene (PE) Marlex ННМ 5502BN;

в) поліпропілен марки PP ERMEC591.

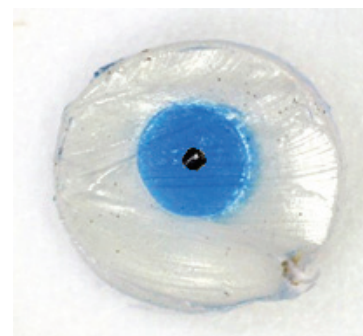
На рис. 5 представлені фотографії зразків полімерних стренг діаметром 4 мм з введеними у внутрішню структуру інжекттованих порцій суміші полімеру з барвниками та макетами, які імітують інтелектуальні датчики. Наведені фотографії експериментальних зразків отримані при куті нахилу інжекційного пристрою  $35^\circ$ .



LDPE RTP 700 A



Marlex ННМ 5502BN



PP ERMEC591

**Рис. 5. Отримані зразки полімерної стренги**

Швидкість інжекції у всіх трьох випадках складала 0,8 м/с, глибина занурення при цьому була близько 2 мм, що відповідає значенням, отриманими під час числового моделювання.

### **Висновок**

Представлені результати експериментальних досліджень глибини введення корелюють з даними числового моделювання. Моделювання показало, що завдяки зміні параметрів процесу інжекції вдалося регулювати глибину занурення та відстеження частинок в полімерному розплаві. Найбільше значення заглиблення досягається при використанні в інжекційному механізмі матеріалу з більшою в'язкістю, відносно матеріалу, який знаходиться в основному екструзійному формуючому каналі. Визначено, що оптимальний кут інжекції становить  $35^\circ$ .

### **Література.**

1. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы / Юрий Анатольевич 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. Лихачев, А. Н. Особенности создания «интеллектуальных» конструкций формо- и размеростабильных систем космических аппаратов на основе диэлектрических полимерных материалов [Текст] / А. Н. Лихачев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2013. — № 1 (47). — С. 114–118.
10. Івіцький І. І. Моделювання введення інтелектуальних датчиків у розплав полімерного композиційного матеріалу [Текст] / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, В. М. Куриленко // Технологічний аудит та резерви виробництва. — 2016. — №5/3(31). — С. 22–26.
11. 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
12. Сокольський О. Л. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів / О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2014. — №2(94). — С. 66–69.
13. 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. Івіцький // Хімічна промисловість України. — 2013. — №6. — С. 34–37.
14. 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
15. 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.

**Abstract.** *The investigation of the process of extrusion-injection molding of polymer products has been carried out. The simulation was carried out in the inner channel of the forming head, in which, using the injection mechanism, a mixture of particles with the test material was introduced into the main stream, in order to control the depth of immersion and trace the particles in the polymer melt. Numerical experiments were carried out at different angles of inclination of the injection mechanism, namely: from 10° to 90°, while the speed of the main extrusion stream and, consequently, the injection rate of the mixture of particles with the investigated material changed.*



### References.

1. Mykhailyn, Ya.A. (2008). Spetsyalnye polymernye kompozytsyonnye materyaly [Spezial 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
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. Likhachev, A.N. Features of creation of "intellectual" constructions of form and size-stable systems of spacecraft based on dielectric polymer materials [Text] / A. N. Likhachev // Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after. academician MF Reshetnev. - 2013. - No. 1 (47). - P. 114-118.
10. Ivitskiy I. I. Simulation of the introduction of intelligent sensors in the melt of polymeric composite material [Text] / I. I. Ivitskiy, O. L. Sokolskiy, V. M. Kurylenko // Technological audit and production reserves. - 2016 - №5 / 3 (31). - P. 22-26.
11. 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
12. Сокольський, О. Л., Івіцький, І. І., Сівецький, В. І., Мікульонок, І. О. (2014). Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів. Наукові вісті НТУУ «КПІ», №2(94), 66—69.
13. Сокольський, О. Л., Сівецький, В. І., Мікульонок, І. О., Івіцький, І. І. (2013). Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні. Хімічна промисловість України, №6, 34—37.
14. Ivitskiy, I. I. (2014). Polymer Wall Slip Modelling. Technology Audit and Production Reserves, Vol 5, N 3(19), 8—11. Doi: 10.15587/2312-8372.2014.27927
15. Sokolskiy, A. L., Ivitskiy, I. I. (2014). Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment. Modern Scientific Research and their Practical application, Vol. J21410, 137—140.