

## АНОТАЦІЯ

*Витвицький В. М.* Обладнання та процес живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню руху гранульованих полімерних матеріалів у зоні живлення черв'ячного екструдера та його впливу на конструктивно-технологічні параметри зазначеної зони, що необхідно для ефективного проєктування та експлуатації екструзійного обладнання в цілому.

Проведено аналітичний огляд сучасного стану досліджень процесу живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною. Розглянуто існуючі методи моделювання обладнання та процесу живлення одночерв'ячного екструдера полімерною сировиною та особливості її перероблення. Проведено аналіз існуючих методів та установок для проведення досліджень триботехнічних властивостей полімерної сировини та вплив на них таких параметрів як навантаження, температура та швидкість рухомого робочого органу.

За результатами проведеного огляду встановлено, що найближчим до реальної поведінки полімерних гранул у робочому каналі черв'ячного екструдера є опис руху сипкого середовища на базі методу дискретного елемента (МДЕ), який полягає в дослідженні взаємодії окремої частинки з іншими частинками шару сипкого матеріалу та границями розрахункової області. При цьому для виконання відповідних числових розрахунків необхідним є дослідження коефіцієнтів тертя і бічного тиску оброблюваних матеріалів та їх залежностей від конструктивно-технологічних параметрів зони живлення екструдера.

Також варто зазначити, що дослідження триботехнічних властивостей полімерних матеріалів, що необхідні для проведення числових розрахунків, зазвичай проводяться для монолітних зразків, а не для гранульованого матеріалу, хоча від точності врахування коефіцієнта зовнішнього тертя та коефіцієнта бічного тиску сипкого матеріалу залежить точність проектування екструзійного обладнання для переробки полімерної сировини. Крім того, відсутня єдина методика для експериментального визначення коефіцієнтів зовнішнього тертя й бічного тиску, а більшість існуючих установок для визначення триботехнічних властивостей не дають змоги проводити дослідження саме для гранульованих полімерних матеріалів.

Для моделювання процесів руху сипкого матеріалу в роботі використано математичну модель дискретного опису руху сипкого матеріалу на базі методу дискретного елемента, яка дала змогу розглянути полімер у вигляді окремих гранул та врахувати вплив форми і розмірів окремих гранул на характер взаємодії полімеру із стінками робочих органів обладнання. Для опису взаємодії між гранулами було використано в'язко-пружну модель Hertz–Mindlin, яка допускає, що частинки, які мають форму сфери, під час контакту не деформуються, а перекривають одна одну на певну величину, утворюючи пляму контакту.

Проведено дослідження взаємодії між гранулами таких чотирьох полімерів: поліетилену високої густини марки Marlex ННМ 5502ВН (ПЕВГ), співполімеру етилену з вінілацетатом (севілену) марки 11104-030 (СЕВ), полістиролу марки Denka Styrol MW-1-301 (ПС), полівінілхлориду марки SorVyl G 2171/9005 11/01 (ПВХ). Дослідження проведено для задач формування кута природного укусу (КПУ) та руху потоку гранул на прикладі шнекового живильника.

Використання дискретного підходу дало змогу врахувати вплив форми й розмірів окремих гранул на характер взаємодії полімеру зі стінками робочих органів обладнання. Проведено порівняння двох підходів до моделювання

форми гранул: за умови розгляду гранул у формі сфер та у формі мультисфер, коли розрахункова форма гранул максимально наближається до реальної.

Отримані результати показали, що модель МДЕ з аналізом гранул у формі мультисфер адекватно відтворює поведінку сипких матеріалів, на відміну від аналізу гранул у вигляді сфер. Порівняно з натурним експериментом модель МДЕ для розрахунку КПУ з використанням методу мультисфер у разі ПЕВГ та СЕВ дає похибку меншу в 3 рази, ніж модель МДЕ з використанням методу сфер, у разі ПС – похибку меншу в 6 разів, у разі ПВХ – похибку меншу в 9 разів. Різниця передусім зумовлена складною формою гранул, що безпосередньо впливає на формування КПУ утворюваного ними шару.

Додаткову верифікацію відповідності поведінки реального матеріалу змодельованому проведено за допомогою дослідження масової продуктивності шнекового живильника методами натурних, числових експериментів і аналітичного розрахунку та їх порівнянні. При числовому розрахунку використовувались гранули, змодельовані методом мультисфер.

Для всіх досліджених полімерів дані числового розрахунку краще корелюють з експериментальними даними, ніж аналітичні дані. При цьому найменша розбіжність між даними натурального експерименту та числового розрахунку складає 2 %, найбільша – 8 %, у той час як найменша розбіжність між даними натурального експерименту та аналітичного розрахунку складає 6 %, найбільша – 17 %.

Результати проведених розрахунків підтверджують можливість застосування методу МДЕ для розв'язання задач, пов'язаних з поведінкою сипких середовищ, зокрема для процесу живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною. Проте для таких досліджень необхідним є попереднє експериментальне дослідження коефіцієнтів тертя і бічного тиску оброблюваних матеріалів та встановлення їх залежностей від конструктивно-технологічних параметрів зони живлення черв'ячного екструдера в умовах, наближених до експлуатаційних.

Було проведено відповідні експериментальні дослідження коефіцієнтів тертя і бічного тиску оброблюваних полімерів та встановлення їх залежностей від конструктивно-технологічних параметрів зони живлення від таких конструктивно-технологічних параметрів зони живлення, як тиск, температура, швидкість обертання робочого органу та кількість гранул по висоті робочого каналу.

Розроблено методику проведення відповідних досліджень та створено експериментальні установки для їх проведення. Конструкція установок захищена патентами України на корисні моделі, створені установки та відповідні методики використовуються в навчальному процесі під час виконання лабораторних робіт, курсового й дипломного проектування на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Перша серія експериментальних досліджень дала змогу отримати залежності коефіцієнта тертя гранульованих полімерів від тиску та температури, які доводять необхідність врахування форми гранул та типу полімеру при конструюванні нового обладнання. Проте установка, що використовувалась при проведенні відповідних досліджень, не дозволила змінювати навантаження на досліджуваний матеріал у широкому діапазоні значень, отримувати залежності коефіцієнта тертя від швидкості обертання поверхні, а також визначити величину бічного тиску.

Установка, використана для проведення другої серії експериментальних досліджень, дала змогу усунути зазначені недоліки першої установки та дослідити залежності величини коефіцієнта зовнішнього тертя гранульованих матеріалів по різних поверхнях, а також коефіцієнта бічного тиску, залежно від температури, навантаження, швидкості обертання та кількості гранул по висоті робочого каналу в широкому діапазоні значень. Дослідження проведені на основі методу повного факторного експерименту.

Показано, що загалом для всіх типів полімеру значення коефіцієнта тертя спадає. Збільшення тиску та швидкості обертання робочого органу приводить до збільшення коефіцієнта тертя для всіх полімерів крім ПС, для якого має місце зменшення відповідних значень коефіцієнта тертя. Збільшення температури робочої поверхні приводить до збільшення коефіцієнта тертя для всіх полімерів крім ПЕВГ, а кількість гранул по висоті робочого каналу майже не впливає на характер залежностей коефіцієнта тертя.

Коефіцієнт бічного тиску збільшується при: зменшенні тиску для всіх полімерів крім СЕВ; підвищенні температури для всіх полімерів; підвищенні швидкості для гранул ПС та зменшенні швидкості для інших типів полімеру, при цьому для гранул СЕВ та ПВХ залежність більш виражена; збільшення кількості гранул по висоті робочого каналу у разі перероблення ПС та зменшення у разі перероблення СЕВ, для двох інших полімерів коефіцієнт бічного тиску від висоти робочого каналу не залежить.

Найбільш на зростання коефіцієнтів тертя та бічного тиску полімерів впливає одночасна дія температури та швидкості обертання ротора.

Отримані результати дали змогу вдосконалити методику розрахунку процесу живлення черв'ячного екструдера гранульованою полімерною сировиною, а також методику розрахунку процесу екструзії в цілому на базі плоскопаралельної моделі шляхом врахування значень коефіцієнтів тертя та бічного тиску полімерних гранул у вигляді попередньо отриманих функціональних залежностей від тиску, температури, швидкості обертання шнека та кількості гранул по висоті робочого каналу.

Для верифікації було проведено розрахунки процесу живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною на прикладі ПЕВГ та їх співставлення з даними експериментальних досліджень інших авторів. При порівнянні результату розрахунків із експериментальними даними, отримано майже удвічі меншу похибку в разі застосування вдосконаленої методики.

Отримані результати дають змогу врахувати взаємний вплив фізико-механічних властивостей перероблюваного полімерного матеріалу (зокрема

коефіцієнтів тертя та бічного тиску) і параметрів зони живлення черв'ячного екструдера, а отже в разі розроблення та модернізації екструзійного обладнання для перероблення певного полімерного матеріалу визначити раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів черв'ячного екструдера в цілому.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні методів розробки і вдосконаленні процесу та обладнання живлення черв'ячного екструдера гранульованою полімерною сировиною, що забезпечує визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів екструзійного обладнання.

Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а також у ТОВ «Гамапласт» (м. Бориспіль, Київська обл.), що підтверджено актами впровадження.

Ключові слова: черв'ячний екструдер, живлення, полімер, гранула, коефіцієнт тертя, коефіцієнт бічного тиску, моделювання.

## ABSTRACT

*Vytvytskyi V. M.* Equipment and process of screw extruder feeding with polymeric raw material. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

A thesis for obtaining a scientific degree of a Ph.D on specialty 133 – “Industrial Machinery Engineering”. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the study of the movement of granular polymeric materials in the feeding zone of the screw extruder and its influence on the structural and technological parameters of this zone, which is necessary for the effective design and operation of extrusion equipment in general.

An analytical review of the current state of research of the process of feeding of screw extruder with polymer raw materials has been carried out. The existing methods of modeling the equipment and the process of feeding of single-screw extruder with polymer raw materials and the peculiarities of its processing have been considered. The analysis of existing methods and devices for researches of tribotechnical properties of polymeric raw materials and influence of such parameters as loading, temperature and speed of a mobile working body on them has been carried out.

According to the results of the review, it has been established that the closest to the actual behavior of polymer granules in the working channel of the screw extruder is the description of the flow of bulk medium based on the Discrete Element Method (MDE), which is studying the interaction of a single particle with other particles of the bulk material layer and the boundaries of the calculation area. In this case, to perform the appropriate numerical calculations, it is necessary to study the friction coefficients and lateral pressure coefficients of the processed materials and their dependences on the design and technological parameters of the feeding zone of the extruder.

It should also be noted that studies of the tribotechnical properties of polymeric materials required for numerical calculations are usually performed for monolithic

samples and not for granular material, although the design accuracy of extrusion equipment for processing polymeric raw materials depends on the accuracy of the external friction coefficient and the lateral pressure coefficient of bulk material. In addition, there is no single method for the experimental determination of external friction coefficients and lateral pressure coefficients, and most of the existing devices for the determination of tribotechnical properties do not allow to conduct research for granular polymeric materials.

To modeling the processes of bulk material movement, a mathematical model of discrete description of bulk material motion based on the Discrete Element Method was used, which allowed to consider the polymer in the form of individual granules and take into account the influence of shape and size of individual granules on the interaction of polymer with walls of working bodies of the equipment. The Hertz – Mindlin visco-springy model was used to describe the interaction among the granules, which assumes that the spherical particles do not deform during contact, but overlap each other by a certain amount, forming a contact spot.

The study of the interaction among the granules of the following four polymers has been conducted: high-density polyethylene of brand Marlex HHM 5502BN (HDPE), copolymer of ethylene with vinyl acetate (sevilene) of brand 11104-030 (CEV), polystyrene of brand Denka Styrol MW-1-301 (PS), polyvinyl chloride of brand SorVyl G 2171/9005 11/01 (PVC). The research has been carried out for the problems of forming the angle of natural slope (APS) and the movement of the flow of granules on the example of a screw feeder.

The use of a discrete approach made it possible to take into account the influence of the shape and size of individual granules on the nature of the interaction of the polymer with the walls of the working bodies of the equipment. A comparison of two approaches to modeling the shape of granules has been carried out: under the condition of considering granules in the form of spheres and in the form of multispheres, when the calculated form of granules is as close as possible to the real one.



The obtained results showed that the MDE model with the parser in the form of multispheres adequately reproduces the behavior of bulk materials, in contrast to the analysis of granules in the form of spheres. Compared to the full-scale experiment, the MDE model for calculating the APS using the multisphere method in the case of HDPE and CEV gives an error 3 times less than the MDE model using the sphere method, in the case of PS - the error is 6 times less, in the case of PVC - the error is 9 times less. The difference is primarily due to the complex shape of the granules, which directly affects the formation of the APS of the layer formed by them.

Additional verification of the conformity of the behavior of the real material to the simulated one has been carried out by studying the mass productivity of the screw feeder by the methods of full-scale, numerical experiments and analytical calculation and their comparison. In case of the numerical simulations granules simulated by multispheric method were used.

For all investigated polymers, the numerical calculation data correlate better with the experimental data than the analytical data. The smallest discrepancy between the data of the full-scale experiment and numerical calculation is 2%, the largest is 8%, while the smallest discrepancy between the data of the full-scale experiment and analytical calculation is 6%, the largest is 17%.

The results of the calculations confirm the possibility of using the MDE method to solve problems related to the behavior of bulk media, in particular for the process of feeding the screw extruder with polymer raw materials. However, such studies require a preliminary experimental study of the friction coefficients and lateral pressure coefficients of the processed materials and the establishment of their dependences on the design and technological parameters of the feed zone of the screw extruder in conditions close to operational.

Appropriate experimental studies of the friction coefficients and lateral pressure coefficients of the treated polymers and their dependences on the design and technological parameters of the feeding zone from such design and technological parameters of the feeding zone as pressure, temperature, speed of rotation of the

working body and number of granules along the height of the working channel have been conducted.

The method of carrying out the corresponding researches has been developed and experimental devices for their carrying has been created. The design of devices is protected by patents of Ukraine for utility models, created devices and corresponding techniques are used in the educational process during laboratory works, course projects and diploma at the Department of Chemical, polymer and silicate engineering of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

The first series of experimental studies made it possible to obtain the dependences of the friction coefficient of granular polymers on pressure and temperature, which prove the need to take into account the shape of the granules and the type of polymer while designing of new equipment. However, the device used in the relevant studies did not allow to change the load on the test material in a wide range of values, to obtain the dependence of the friction coefficient on the speed of rotation of the surface, as well as to determine the value of lateral pressure coefficient.

The device used for the second series of experimental studies allowed to eliminate these shortcomings of the first device and to investigate the dependences of the external friction coefficient of granular materials on different surfaces, as well as the lateral pressure coefficient, depending on temperature, load, speed and number of granules along the height of the working channel in a wide range of values. The research was conducted on the basis of the method of complete factorial experiment.

It has been shown that in general for all types of polymer the value of the friction coefficient decreases. Increasing the pressure and speed of rotation of the working body leads to an increase in the friction coefficient for all polymers except PS, for which there is a decrease in the corresponding values of the friction coefficient. Increasing the working surface temperature leads to an increase in the friction coefficient for all polymers except HDPE, and the number of granules along

the height of the working channel has almost no effect on the nature of the dependences of the friction coefficient.

The lateral pressure coefficient increases in such cases: the pressure decreases for all polymers except CEV; increasing the temperature for all polymers; increasing the velocity for PS granules and decreasing the velocity for other types of polymer, while for CEV and PVC granules the dependence is more pronounced; increase in the number of granules along the height of the working channel in the case of processing of PS and decrease in the case of processing of CEV, for the other two polymers the lateral pressure coefficient does not depend on the height of the working channel.

The increase in the friction coefficient and lateral pressure coefficient of polymers is most affected by the simultaneous action of temperature and rotation speed of the rotor.

The obtained results allowed to improve the method of calculating the process of feeding the screw extruder with granular polymer raw materials, as well as the method of calculating the extrusion process as a whole on the basis of plane-parallel model by taking into account the values of friction coefficients and lateral pressure coefficients of polymer granules in the form of previously obtained functional dependencies on pressure, temperature, screw speed and number of granules along the height of the working channel.

The calculations of the process of feeding the screw extruder with polymer raw materials on the example of HDPE and their comparison with the data of experimental studies of other authors have been conducted for the verification. When comparing the results of calculations with experimental data, almost twice less error has been obtained in the case of using an improved method.

The obtained results make it possible to take into account the mutual influence of physical and mechanical properties of the processed polymeric material (including friction coefficients and lateral pressure coefficients) and parameters of the screw extruder feeding zone, and therefore in case of development and modernization of extrusion equipment for processing a certain polymeric material to determine the

rational values of design and technological parameters of the screw extruder in general.

The scientific novelty of the obtained results is the creation of methods for development and improvement of the process and equipment for feeding the screw extruder with granular polymer raw materials, which provides the definition of rational design and technological parameters of extrusion equipment.

Scientific and technical results of the dissertation have been introduced to the educational process of the Department of Chemical, polymer and silicate engineering of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" as well as to the LLC "Gamaplast" (Boryspil, Kyiv region), which is confirmed by implementation acts.

Keywords: screw extruder, feeding, polymer, granule, friction coefficient, lateral pressure coefficient, modeling.

### **Список публікацій здобувача за темою дисертації**

#### **Статті у наукових фахових виданнях**

1. Pressure and temperature influence on the friction coefficient of granular polymeric materials on the metal surfaces / V. Vytvytskyi, I. Mikulionok, O. Sokolskyi, O. Gavva. *Ukrainian Food Journal*. 2017. Vol. 6, Iss. 3. P. 543–552. DOI: 10.24263/2304-974X-2017-6-3-14. (Входить до наукометричних баз Web of science, Index Copernicus).

2. Дослідження триботехнічних властивостей гранульованих полімерних матеріалів / В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонко. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Том 29 (68), Ч. 1, № 5, С. 9–13. (Входить до наукометричної бази Index Copernicus).

3. Determining efficient values for the thermophysical properties of bulk materials / A. Karvatskii, Ye. Panov, G. Vasylichenko, V. Vytvytskyi, K. Korolenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics*. 2019. Vol. 2,

Iss. 5. P. 55–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.164791. (Входить до наукометричної бази Scopus).

4. Vytvytskyi V. M., Mikulionok I. O., Sokolskyi O. L. Experimental study of the granular polystyrene frictional. *SWorldJournal*. Bulgaria, 2019. Iss. 2, Part 2. P. 16–21. DOI: 10.30888/2410-6615.2019-02-02-009. (Входить до наукометричної бази Index Copernicus, закордонне видання).

5. Vytvytskyi V. M., Mikulionok I. O., Sokolskyi O. L. Simulation of the process of screw extruder feeding with granular polymeric raw material. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. Germany, 2020. Iss. 12, Part 1. P. 38–44. DOI: 10.30890/2567-5273.2020-12-01-053. (Входить до наукометричної бази Index Copernicus, закордонне видання).

#### **Апробація матеріалів дисертації на конференціях**

1. Визначення кута природного укусу та коефіцієнтів тертя деяких полімерних матеріалів / В. М. Витвицький, І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, Д. Г. Швачко. *Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів* : збір. доп. наук.-практ. конф. студ., аспір. та наук., 18 груд. 2014 р. Київ : НТУУ КПІ, 2014. С. 29–30.

2. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Зона живлення черв'ячних машин. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки* : збір. доп. всеукр. наук.-практ. конф., 11–12 черв. 2015 р. Київ : НТУУ КПІ, 2015. С. 45–46.

3. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Експериментальне дослідження коефіцієнта тертя гранульованого полімерного матеріалу по металевій поверхні. *Актуальні задачі сучасних технологій* : збір. тез доп. IV Міжнар. наук.-техн. конф. мол. учен. та студ., 25–26 лист. 2015 р. Тернопіль : ТНТУ, 2015. т. 1. С. 7.

4. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Експериментальне дослідження залежності коефіцієнта тертя севілену марки

11104-030 від тиску у гвинтовому каналі екструдера за різних глибин каналу. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки* : збір. доп. II Всеукр. наук.-прак. конф., 16–17 груд. 2015 р. Київ : НТУУ КПІ, 2015. С. 40.

5. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Установа для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя кускового або сипкого матеріалу. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки* : збір. доп. II Всеукр. наук.-прак. конф., 16–17 груд. 2015 р. Київ : НТУУ КПІ, 2015. С. 106–107.

6. Установа для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя кускового або сипкого матеріалу / В. М. Витвицький, І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, Д. Г. Швачко. *Новітні технології пакування* : матеріали доп. XV Наук.-прак. конф. молод. вчен., дод. до журн. «Упаковка». Київ : НУХТ, 2016. С. 14–16.

7. Витвицький В. М., Сокольський О. Л., Мікульонок І. О. Коефіцієнт тертя гранульованого поліетилену. *Композиційні матеріали* : збір. доп. IX Міжн. наук.-техн. Web-конф., трав. 2016 р. Київ : НТУУ КПІ, 2016. С. 66.

8. Витвицький В. М., Сокольський О. Л., Мікульонок І. О. Розрахунки процесу неізотермічного живлення черв'ячного екструдера. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки* : збір. доп. III Всеукр. наук.-прак. конф., 9–10 черв. 2016 р. Київ : НТУУ КПІ, 2016. С. 59.

9. Витвицький В. М., Сокольський О. Л., Мікульонок І. О. Експериментальні дослідження впливу тиску та температури на коефіцієнт тертя гранульованих полімерів по металу. *Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності* : матеріали доп. V Міжнар. спец. наук.-прак. конф., 14 вер. 2016 р. Київ : НУХТ, 2016. С. 95–97.

10. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Особливості проектування екструзійного обладнання для перероблення полімерів. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки*

: збір. доп. IV Всеукр. наук.-практ. конф., 15–16 груд. 2016 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. С. 24.

11. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Розрахунок процесу транспортування гранульованих матеріалів у шнекових машинах. *Новітні технології пакування* : матеріали доп. XVI Наук.-практ. конф. мол. вчен., дод. до журн. «Упаковка». Київ : НУХТ, 2017. С. 29–30.

12. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Удосконалення алгоритму розрахунку процесу екструзії гранульованих полімерних матеріалів. *Авіа-2017* : матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф., 19–21 квіт. 2017 р. Київ : НАУ, 2017. С. 27.14–27.16.

13. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Експериментальні дослідження транспортування полімеру шнековим живильником. *Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання* : матеріали X Всеукр. студ. наук.-техн. конф., 25–26 квітня 2017 р. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2017. т. 1. С. 134–135.

14. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Порівняння експериментальних та теоретичних даних щодо масової продуктивності шнекових живильників для різних типів полімерних матеріалів. *Проблеми техніки і технології переробних виробництв* : збір. доп. III Міжнар. наук.-практ. конф., 30–31 трав. 2017 р. Покровськ : ДВНЗ «ДонНТУ», 2017. С. 109–111.

15. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Експериментальні дослідження масової продуктивності та потужності процесу транспортування полімеру шнековим живильником. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки* : збір. доп. V Всеукр. наук.-практ. конф., 8–9 червня 2017 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 65–66.

16. Витвицький В. М., Сокольський О. Л., Мікульонок І. О. Експериментальні дослідження масової продуктивності шнекового живильника. *Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування*

харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності : матеріали VI Міжнар. спец. наук.-прак. конф., 12 вер. 2017 р. Київ : НУХТ, 2017. С. 112–113.

17. Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу / В. М. Витвицький, І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, С. В. Бардашевський. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та прог. V Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф., 17–20 квіт. 2018 р. Суми : СумДУ, 2018. С. 242–243.

18. Конструктивні особливості пристроїв для проведення експериментальних досліджень триботехнічних властивостей сипких матеріалів / В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський, І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки* : збір. доп. VIII Всеукр. наук.-практ. конф., 13–14 грудня 2018 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 18–20.

19. Експериментальні дослідження триботехнічних властивостей гранульованих полімерних матеріалів / В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський, І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський. *Aktuelle Themen im Kontext der Entwicklung der modernen Wissenschaften* : збір. наук. праць «ЛОГОС» до мат. міжн. наук.-практ. конф., 23 січ. 2019. Німеччина, Дрезден: Громадська організація «Європейська наукова платформа», 2019. т. 5. С. 58–60.

20. Числове моделювання руху полімерних гранул у шнековому живильнику / В. М. Витвицький, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський. *Прикладні науково-технічні дослідження* : матеріали III Міжнар. наук.-прак. конф., 3–5 квіт. 2019 р. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. С. 56.

21. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Експериментальні дослідження впливу експлуатаційних режимів шнекових машин на рух оброблюваного матеріалу. *Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності* : матеріали VIII Міжнар. спец. наук.-прак. конф., 12 вер. 2019 р. Київ : НУХТ, 2019. С. 155–157.



22. Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л.  
Експериментальні дослідження фрикційних властивостей гранульованого  
співполімер етилену з вінілацетатом (севілену). *Ефективні процеси та  
обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки* : збір. доп. X Всеукр.  
наук.-практ. конф., 12–13 грудня 2019 р. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019.  
С. 69–71.

### **Патенти України на корисні моделі**

1. Установка для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя  
кускового або сипкого матеріалу: пат. 107473 Україна : МПК G01N 19/02  
(2006.01) / О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок, Д. Г. Швачко,  
В. М. Витвицький ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ.  
політехн. ін-т». № u201511736; заявл. 27.11.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 11.

2. Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя  
сипкого матеріалу: пат. 124170 Україна : МПК G01N 19/02 (2006.01) /  
І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. М. Витвицький, Д. Г. Швачко ; заявник  
і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря  
Сікорського». № u201710073; заявл. 18.10.2017; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6.

3. Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя  
сипкого матеріалу: пат. 132798 Україна : МПК G01N 19/02 (2006.01) /  
І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський ;  
заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т  
ім. Ігоря Сікорського». № u201809947; заявл. 05.10.2018; опубл. 11.03.2019,  
Бюл. № 5.

4. Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя  
сипкого матеріалу: пат. 133176 Україна : МПК G01N 19/02 (2006.01) /  
І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський ;  
заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т  
ім. Ігоря Сікорського». № u201810492; заявл. 05.10.2018; опубл. 25.03.2019,  
Бюл. № 6.

5. Установа для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу: пат. 136583 Україна : МПК G01N 19/02 (2006.01) / І. О. Мікульонюк, А. Я. Карвацький, О. Л. Сокольський, В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського». № u201902286; заявл. 06.03.2019; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.

6. Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу: пат. 139817 Україна : МПК G01N 19/02 (2006.01) / С. В. Бардашевський, В. М. Витвицький, І. О. Мікульонюк, О. Л. Сокольський ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського». № u201906269; заявл. 05.06.2019; опубл. 27.01.2020, Бюл. № 2, 2020.