

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ  
КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІННОВАЦІЙНІ  
ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ»**



**ОДЕСА**

2017

Публікуються доповіді, представлені на VI Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (4 – 8 вересня 2017 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

доктор техн. наук, професор

О.Г. Бурдо

Ю.О. Левтринська

Е.Ю. Ананійчук

О.В. Катасонов

## МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

- Єгоров**  
*Богдан Вікторович* - голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
- Бурдо**  
*Олег Григорович* - вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
- Атаманюк**  
*Володимир Михайлович* – Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
- Васильєв**  
*Леонард Леонідович* – Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н, професор
- Гавва**  
*Олександр Миколайович* – Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Гумницький**  
*Ярослав Михайлович* – Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
- Долинський**  
*Анатолій Андрійович* –Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАНУ
- Зав’ялов**  
*Владимир Леонідович* – Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Керш**  
*Владимир Яковлевич* – Одеська державна академія будівництва та архітектури, д.т.н., професор
- Колтун**  
*Павло Семенович* – Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
- Корнієнко**  
*Ярослав Микитович* – Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
- Малежик**  
*Іван Федорович* – Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Михайлов**  
*Валерій Михайлович* – Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н, професор
- Паламарчук**  
*Ігор Павлович* – Вінницький національний аграрний університет, д.т.н., професор
- Снежкін**  
*Юрій Федорович* –Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., член-кор. НАНУ
- Сорока**  
*Петро Гнатович* – Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
- Тасімов**  
*Юрій Миколайович* – Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
- Товажнянський**  
*Леонід Леонідович* – Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
- Ткаченко**  
*Станіслав Йосифович* – Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
- Ульєв**  
*Леонід Михайлович* – Національний технічний університет Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
- Черевко**  
*Олександр Іванович* – Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н, професор
- Шит**  
*Михайл Львович* – Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.

энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011». – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 - 426.

6. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах: Учебник. [Текст] – Одесса: Друк, 2008. – 348с.

7.

УДК 532.135

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ  
РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН – КАУЧУК**  
магістрант Гоцький Я. Г., к.т.н, ст. викл. Двойнос Я. Г., Національний  
технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ

**MATHEMATICAL MODEL OF HOMOGENIZATION MELT  
COMPOSITION POLYETHYLENE - RUBBER**

undergraduate Hotskij Y.G., Ph.D., senior lecturer Dvoinos Y.G.,  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

*Анотація.* Робота присвячена моделюванню процесу змішування та диспергування силіконового каучуку з розплавом поліетилену з у робочих зазорах одночерв'ячного екструдера та зазорах змішуючого спірального елемента Маддока. Присвячено увагу технологічності елемента змішуючого, та інтеграції методів формування до геометричних умов фізичної моделі, що дозволяє наблизити розрахунки до реальної конструкторської розробки. Проведено аналіз відомих гідродинамічних моделей та методів визначення якості змішування за накопиченою деформацією.

Відповідно до технології переробки композиції обґрунтовано вимоги до якості змішування та температури розплаву, що дозволило сформулювати критерій якості процесу та мету моделювання: встановлення залежностей якості процесу змішування від основних геометричних параметрів інструменту.

В результаті чисельного експерименту отримано критичні параметри, які можуть бути використані при проектуванні екструзійного обладнання.

Робота в першу чергу зацікавить інженерів-конструкторів екструзійного та нестандартного обладнання для переробки полімерних матеріалів.

**Abstract.** The work is devoted to modeling the process of mixing and dispersion of silicone rubber with molten plastic from working in the gaps and gaps one screw extruder mixing spiral element Maddoka. Attention is paid to the technological element of the mixing and integration methods of forming geometrical conditions to the physical model, allowing calculations to approximate the real design project. The analysis of known hydrodynamic models and methods for determining the quality of mixing accumulated strain.

According to the technology of processing compositions justified demands for quality mixing and temperature of the melt-temperatures, which allowed formulating quality criteria and objective process modeling: depending installation as the mixing of basic geometric parameters of the tool.

As a result of numerical experiments obtained characteristic equation may be use the design of extrusion equipment.

Working primarily interested in design engineers and non-standard extrusion equipment processing of polymeric materials.

**Ключові слова:** каучук з силікону, індекс перемішування, розплав поліетилену, екструдер, черв'як екструдера.

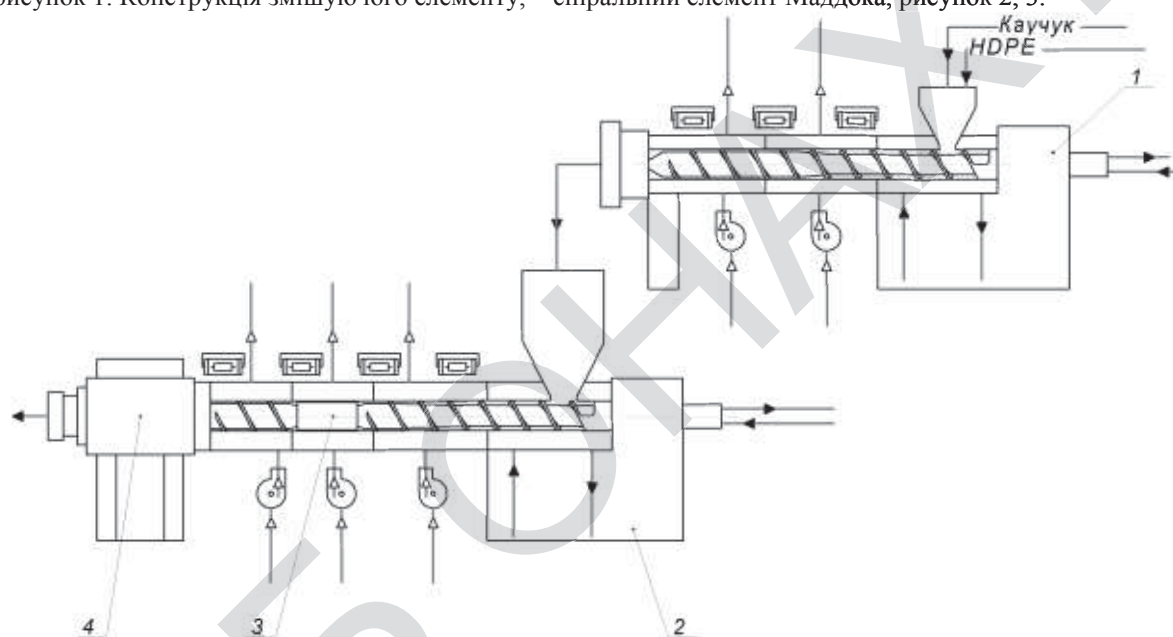
**Keywords:** rubber silicone, mixing index, melt plastic, extruder, extruder screw.

Переробка та створення нових композицій на основі полімерів є актуальним, оскільки ці матеріали отримують кращі експлуатаційні характеристики, а саме, при незначному додаванні каучуку до полімеру збільшуються механічні характеристики отриманої композиції, такі як еластичність, удароміцність та морозостійкість. Світова компанія DuPont використовує концентрати з первинними амідами жирних кислот на основі рослинної сировини для отримання композиції з низьким коефіцієнтом тертя.

Каучук з силікону марки СКТН [1] Запорізького державного підприємства "Кремнійполімер" разом з МФСН-В (затверджувач і стабілізатор) та поліетиленом утворюють композицію з антифрикційними властивостями, які дозволяють використати новий матеріал як антифрикційне покриття внутрішньої поверхні труб захисних з поліетилену для монтажу оптоволоконних кабелів зв'язку. Перевага силіконових добавок у стабільності властивостей, – полімеризований високомолекулярний силіконовий каучук не розчиняється у поліетилені, і відповідно, не мігрує в середину стінки труби. Крім того, температура менше впливає на коефіцієнт тертя. Відомий мастербатч Dow Corning® MB25-035 фірми DOW CORNING на основі силікону.

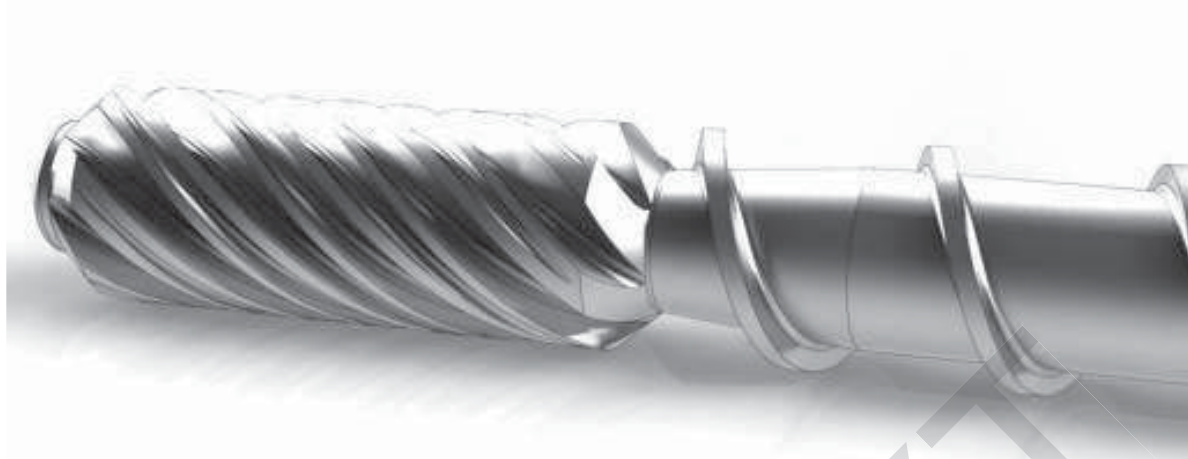
Традиційно, технологія екструзії таких композицій передбачає створення гранульованого концентрату, який у екструдері внутрішнього шару перемішується з основним матеріалом. Відповідно, концентрат містить значно більшу концентрацію адитивів.

Процес виробництва поліетилен-каучукових композицій є складним оскільки важко досягти рівномірного розподілу каучуку по всьому об'єму матеріалу. Основним обладнанням виробництва концентратів є двочерв'ячний або осцилюючий екструдер, – це обладнання має високі показники змішування та диспергування. На підприємстві ТОВ "Технопласт", м. Боярка впроваджено технологію виготовлення композицій поліолефінів з силіконовим каучуком за наступною технологічною схемою, рисунок 1. Конструкція змішуючого елемента, – спіральний елемент Маддока, рисунок 2, 3.



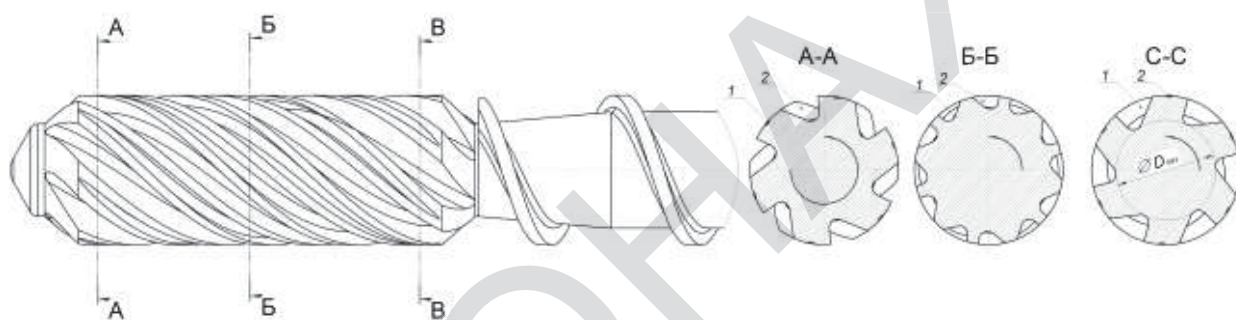
1 – екструдер одночерв'ячний №1 (механічно перетирає суміш); 2 – екструдер одночерв'ячний №2;  
3 – змішуючий елемент екструдера; 4 – гранулююча головка.

**Рисунок 1. Технологічна схема виробництва гранульованого концентрату поліетилену з силіконовим каучуком**



**Рисунок 2. Зовнішній вигляд спірального елемента Маддока**

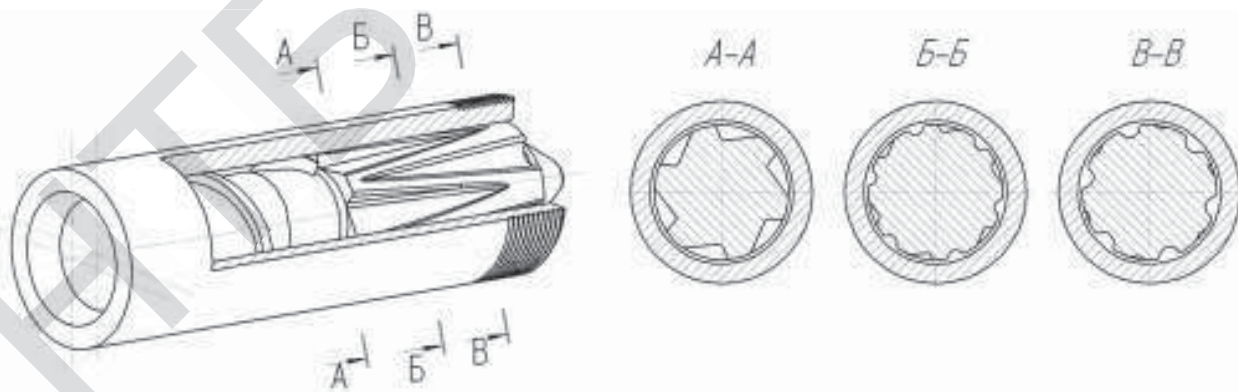
Перевагою спіральної форми елемента Маддока є більша довжина зазору, через який має переміститись полімерна композиція, що забезпечує зменшення тиску у напірних каналах (позиція 1 рисунку 3).



1 – канал напірний (перед робочим зазором); 2 – канал відводу (після робочого зазору);

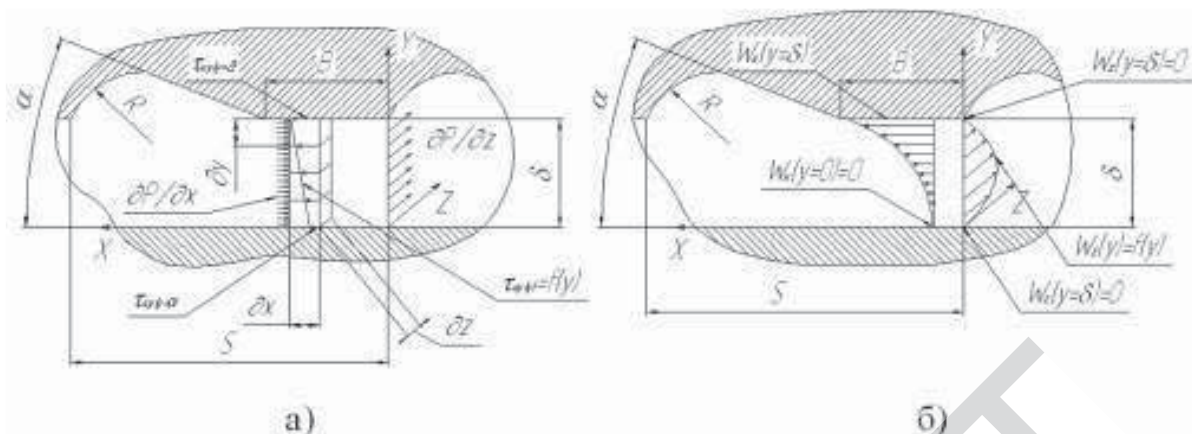
**Рисунок 3. Креслення спірального елемента Маддока**

Спростивши модель спірального елемента до звичайного, у якого довжини зазорів однакові, рисунок 4.



**Рисунок 4. Схема змішувальної секції екструдера, еквівалентної спіральному елементу Маддока**

На рисунку 5 зображено фізичну модель процесу змішування розплаву полімеру у каналі насадки шнека одночервячного екструдера.



а – геометричні умови та сили, що діють на розплав полімеру;  
б – граничні умови швидкості потоку.

**Рисунок 5 – Фізична модель процесу змішування полімеру в змішувальній секції екструдеру**

Рух розплаву полімеру в каналі насадки шнека є складним, тому для визначення ефективної в'язкості

$\mu_{ef}$  використовується другий інваріант швидкості зсуву:  $\mu_{ef} = \mu_0 \left( \frac{I}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}$ , де  $\mu_0$  – в'язкість при нульовому зсуву;  $I$  – другий варіант тензора швидкостей деформації;  $n$  – реологічна константа:

$$I_{II} = 2 \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right].$$

Зробив припущення плоско паралельної моделі отримаємо рівняння рівноваги сил, що діють на розплав у робочих зазорах насадки:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}; \quad \tau_{xz} = \mu_{ef} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad \tau_{yz} = \mu_{ef} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

де  $\mu_{ef}$  – в'язкість ньютонівської рідини;  $v$  – швидкість потоку;  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$  – напруження зсуву.

Критерієм якості змішування є величина накопиченої деформації зсуву:  $\bar{\gamma} = \bar{\gamma} t$ . Середня швидкість

зсуву:  $\bar{\gamma} = \frac{1}{b\delta} \int_0^{\delta} \int_0^b \frac{I_{22}}{2} dx dy$ , де  $b$  – довжина елемента насадки, м. Середній час перебування частинок

розплаву:  $t = \frac{V}{Q}$ , де  $V$  – об'єм апарату, м<sup>3</sup>;  $Q$  – витрати, м<sup>3</sup>/с.

**Висновок:** геометричні умови течії композиції розплаву у клиновому зазорі напірного каналу викликають появу додаткового гідравлічного тиску, що дозволяє зменшити значення робочого зазору при збереженні продуктивності змішуючого елемента та уникнути проковзування розплаву по стінках каналу. Ефективність роботи спірального елемента Маддока напряму залежить від напірної характеристики екструдеру та швидкості обертання черв'яка, однак має межу, обумовлену перегрівом розплаву та початком механодеструкції  $\bar{\gamma} \geq 500 \text{ с}^{-1}$  (температура композиції на вході в зазор 200°C, після зазору – 270°C).

**Перелік посилань:**

1. <http://silic.com.ua/index.php?Lev=silicone-rubbers> (дата звернення: 17.05.2017).
2. <http://www.extrusionwiki.com/wiki/2003BestPaper.ashx> (дата звернення: 17.10.2016).
3. Ким В. С., Скачков В. В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. – М.: Химия, 1988. – 240 с., ил.

<b>Безбах І. В., Кепин Н. И.</b> .....	
ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЭКСТРАКЦИИ, ИСПОЛЗУЮЩИХСЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ	
<b>Недбайло А. Є.</b> .....	285
КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ	
<b>Тришин Ф. А., Терзиев С. Г., Орловская Ю. В.</b> .....	289

### МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ

ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОНВЕКТИВНО – ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО СУШІННЯ	
<b>Малежик І. Ф., Бурлака Т. В., Дубковецький І. В., Деканський В. Є.</b> .....	296
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМІРЧАСТОЇ МОДЕЛІ ІЗ ЗВОРТНИМИ ПОТОКАМИ В ВІБРОЕКСТРАКТОРАХ	
<b>Мистора Т. Г., Зав'ялов В. Л., Лобок О. П., Попова Н. В., Запорожець Ю. В.</b> .....	302
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ІННОВАЦІЙНИХ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ПОЛІМЕРІВ	
<b>Бухкало С. І.</b> .....	309
ДОСВІД РОЗРОБКИ КОМП'ЮТЕРНО - ІНТЕГРОВАНОГО СТЕНДУ ДЛЯ СУПРОВОДУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ МІКРОХВИЛЬОВОГО-ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ	
<b>Яровий І. І.</b> .....	313
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО КЛАСТЕРА В ПРОЦЕСАХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ	
<b>Иваницкий Г. К.</b> .....	319
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭКСТРАКТА СТЕВИИ В МИКРОВОЛНОВОМ ВАУУМ-ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ	
<b>Бурдо О. Г., Ружицкая Н. В., Резниченко Т. А., Резниченко Д. Н.</b> .....	322
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН – КАУЧУК	
<b>Гоцький Я. Г., Двойнос Я. Г.</b> .....	327
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ	
<b>Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур</b> .....	335
ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ	
<b>Остапенко О. П.</b> .....	331
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФА И БИОМАССЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВ	
<b>Снежкин Ю. Ф., Коринчук Д. Н.</b> .....	337
ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ БЛОКА ЛЬДА	
<b>Тришин Ф. А., Трач А. Р.</b> .....	343
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ	
<b>Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур, Масельская Я. А.</b> .....	347
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ	
<b>Бурдо О. Г., Маренченко Е. И., Пилипенко Е. А., Балагура В. В.</b> .....	355
АНАЛІЗ ОПОРІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ РЕЧОВИНИ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНУ ПРИ НАНОФІЛЬРАЦІЇ ТА ЗВОРТНОМУ ОСМОСІ	
<b>Гуліснко С. В.</b> .....	364
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТИТЕЧІЙНОГО ЕКСТРАКТОРА З ПІДВОДОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ	
<b>Левтринська Ю. О., Зиков А. В., Терзиев С. Г.</b> .....	367
К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ КАПЕЛЬ ХЛАДАГЕНТА В ФИЛЬТРЕ ЭЖЕКТОРЕ	
<b>Когут В. Е., Бушманов В., Хмельнюк М. Г.</b> .....	374