

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.  
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

Збірник наукових праць  
За загальною редакцією М.І. Черновола  
Заснований у 1997 році

**В и п у с к 7(38)  
Частина II**

Кропивницький • 2023

---

ISSN 2664-262X

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Central Ukrainian National Technical University

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.  
TECHNICAL SCIENCES**

**Collected Works**  
Under the general editorship of M. Chernovol  
Founded in 1997

**Issue 7(38)  
Part II**

Kropyvnytskyi • 2023

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, ІТ-технологій, роботизації, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.

Науковий вісник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень професорсько-викладацького складу, аспірантів, докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів, науково-дослідних інститутів НАНУ та промислових підприємств України.

Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ЗВО, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 29 травня 2023 року № 9.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Черновол М.І.

Редакційна колегія: Аулін В.В., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Лисенко С.В., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Доренський О.П., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); Васильковський О.М., канд. техн. наук, проф.; Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Галкін А.С., д-р техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Голуб Д.В., канд. техн. наук, доц.; Гриньків А.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Дарієнко В.В., канд. техн. наук, доц.; Дідик О.К., канд. техн. наук, доц.; Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Івашук В.В., д-р техн. наук, доц.; Карпушин С.О., канд. техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Коваленко О.В., д-р техн. наук, доц.; Кондратець В.О., д-р техн. наук, проф.; Коренькова Т.В., д-р техн. наук, доц.; Кузик О.В., канд. техн. наук, доц.; Матейчик В.П., д-р техн. наук, проф.; Мацуї А.М. канд. техн. наук, доц.; Мелешко Є.В., д-р техн. наук, проф.; Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф.; Пашинський В.А. д-р техн. наук, проф.; Пашинський М.В., канд. техн. наук, проф.; Плешков П.Г., канд. техн. наук, проф.; Россолов О.В., д-р техн. наук, доц.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов С.А., канд. техн. наук; Солових Є.К., д-р техн. наук, проф.; Сторчак М.Г., д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Тарандушка Л.А., д-р техн. наук, доц.; Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.; Шепеленко І.В., д-р техн. наук, доц.; Яцун В.В., канд. техн. наук, доц.

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,  
Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522)  
390-472, +380 (522) 390-437, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://mapiea.kntu.kr.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Науковий вісник заснований у 1997 році.

Включений до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (доктора філософії) в галузі технічних наук (постанови Президії ВАК України від 9 червня 1999 року №1-05/7, від 14 жовтня 2009 року № 1-05/4; накази Міністерства освіти і науки України від 29 грудня 2014 року № 1528, від 07 листопада 2018 року № 1218, від 02 липня 2020 року № 886, від 24 вересня 2020 року № 1188).

Науковий вісник зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus*, *CrossRef*, *Open Ukrainian Citation Index*, *WorldCat*, *ResearchBib*, *Google Scholar*

Реєстраційне свідоцтво: серія KB № 23513-13353 ПР від 13.07.2018 р.

ISSN 2664-262X (p), 2707-9449 (o)

DOI: 10.32515/2664-262X

## АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 539.37

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.59-67](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.59-67)**В. В. Івлєв**, канд. техн. наук*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: ivliev.v.v@dsau.dp.ua*

## Чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу

В результаті чисельного моделювання процесу деформації сипкого матеріалу (на прикладі зернового матеріалу) отримані рівняння регресії другого порядку залежностей площі петлі пружного гістерезису і максимального значення сили при 25 % відносній деформації зернового матеріалу від його фізико-механічних властивостей (щільність, коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга). Представлені результати можуть бути використані при подальшому моделюванні або при створенні фізико-математичних моделей процесу стискання зернового матеріалу в грануляторах, екструдерах та експандерах.

**сипкий матеріал, зерно, стискання, сила, деформація, пружний гістерезис, моделювання, симуляція**

**Постановка проблеми.** Пружний гістерезис сипкого матеріалу є важливою проблемою у багатьох галузях науки і техніки, включаючи гірничо-металургійну промисловість, будівництво, енергетику та інженерію [1, 2, 3]. Це пов'язано з тим, що сипкі матеріали складаються з великої кількості частинок, які можуть зсуватися одна відносно іншої під дією зовнішніх навантажень. Цей процес супроводжується енергетичними втратами та змінами форми структури матеріалу, що в свою чергу призводить до пружного гістерезису [4].

Чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу є потужним інструментом для дослідження цих процесів і визначення параметрів матеріалу. Пружний гістерезис сипкого матеріалу описується рядом рівнянь, що включають різні фізичні процеси, які відбуваються в матеріалі [5, 6, 7]. Зокрема, збереження енергії, рух частинок матеріалу, зміна форми структури та ін.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для чисельного моделювання пружного гістерезису використовуються різні підходи, такі як метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод частинок та інші. Метод скінченних елементів використовують для моделювання різних режимів навантаження, включаючи одновісний і двовісний розтяг, згин, стиск та інші. Цей метод також може враховувати різні типи матеріалів, такі як повітряні, рідинні та гірничі, і розглядати їх взаємодію з різними структурами.

Одним з підходів до моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу є використання контактної моделі, яка включає рівняння руху для кожної частинки матеріалу та рівняння контакту між частинками. Це дозволяє враховувати взаємодію між частинками матеріалу, яка є ключовою для розуміння гістерезису.

Для використання методу скінченних елементів у моделюванні пружного гістерезису сипкого матеріалу, спочатку необхідно розбити матеріал на скінченну кількість елементів. Кожен елемент можна описати як масу з кількома ступенями вільності, які характеризують його рух. Рівняння руху елементів можуть бути записані

у вигляді диференційних рівнянь другого порядку, які можна розв'язати чисельним методом, таким як метод Рунге-Кутта [8, 9].

Для визначення рівнянь контакту між частинками матеріалу можуть використовуватися різні моделі, такі як модель зіткнення пружних сфер, модель зіткнення пружних дисків та інші. Рівняння контакту можуть включати різні параметри, такі як коефіцієнт тертя, жорсткість матеріалу та інші [10].

До переваг методу скінченних елементів входить можливість врахування різноманітних умов навантаження та різних типів матеріалів, а також можливість отримання детальної інформації про поведінку матеріалу на мікрорівні [11]. За допомогою цього методу інженери можуть вірно прогнозувати поведінку ґрунтів, зерна та інших структур під різними умовами навантаження, що дозволяє планувати та здійснювати будівельні проекти з меншим ризиком

Однак, при використанні методу скінченних елементів у моделюванні пружного гістерезису сипкого матеріалу необхідно враховувати деякі обмеження [12]. Зокрема, для точного моделювання необхідно враховувати взаємодію між кожною частинкою матеріалу, що може вимагати великої кількості обчислень, що збільшує обчислювальну складність. Крім того, результати чисельного моделювання можуть бути чутливими до вибору параметрів моделі, таких як жорсткість матеріалу та коефіцієнт тертя, що може впливати на точність прогнозування поведінки матеріалу.

У зв'язку з цим, важливо пам'ятати, що чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу є лише інструментом, який повинен бути використаний з обережністю та відповідно до конкретних умов [13, 14]. Інженери повинні ретельно аналізувати результати моделювання та враховувати можливість помилок та неточностей у вхідних даних.

Знання про поведінку матеріалу під різними умовами навантаження є необхідними для розробки безпечних та ефективних інженерних рішень.

**Постановка завдання.** Метою досліджень є визначення параметрів деформації сипкого матеріалу (на прикладі зернового матеріалу) в залежності від його фізико-механічних властивостей в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

**Виклад основного матеріалу.** Для чисельного моделювання приймаємо, що деформація сипкого (зернового) матеріалу відбувається під дією поршня (plunger) на зерно (grain), яке знаходиться в циліндричній ємності (cylinder). Розрахункову схему і геометричні розміри наведено на рис. 1.

В якості фізичних моделей повинні бути обрані наступні: безсіткова DEM (meshfree DEM), інтерполяція рішення (Solution Interpolation), Лагранжева багатофазність (Lagrangian Multiphase), нестационарний неявний (Implicit Unsteady), багатофазна взаємодія (Multiphase Interaction), сила тяжіння (Gravity), модель дискретних елементів DEM (Discrete Element Model (DEM)), граничні сили DEM (DEM Boundary Forces). В якості Лагранжевої фази (Lagrangian Phases) задано зерно (grain) з наступними моделями: сферичні частинки (Spherical Particles), суцільна (Solid), частинка DEM (DEM Particles), постійна щільність (Constant Density), час існування (Residence Time). В якості фазової взаємодії зерно-зерно (grain-grain) обрані наступні моделі: фазова взаємодія DEM (DEM Phase Interaction), Hertz Mindlin, опір кочення (Rolling Resistance), лінійне зчеплення (Linear Cohesion). В якості фазової взаємодії зерно-стінка (grain-wall) обрані наступні моделі: Hertz Mindlin, фазова взаємодія DEM (DEM Phase Interaction), опір кочення (Rolling Resistance). Для області циліндричної ємності (cylinder) обрано область частинок (Particle Region). Для області поршня (plunger) обрано область твердого тіла (Solid Region). Для області поршня (plunger) нижня площина повинна бути виділена окремо і мати назву force. Інжектор (Injectors) зерна (grain) має тип випадкового інжектора (Random Injector) на область циліндричної

ємності (cylinder). Умова упаковки частинок (Particle Packing Specification) – лічильник частинок (Particle Count). Діаметр зерна (grain) приймаємо 0,005 м. Число частинок (Number of Particles) – 6000.

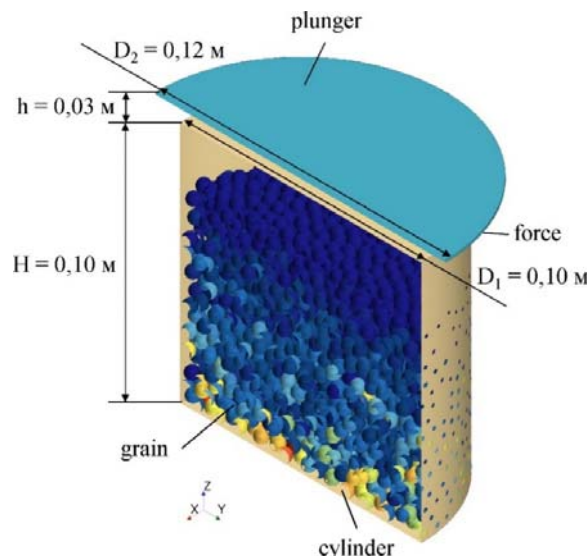


Рисунок 1 – Розрахункова схема дослідження деформації зернової суміші

Джерело: розроблено автором

Налаштування розв'язувача (Solvers): крок часу (Time-Step) - 0,001 секунди, параметри зупинки (Stopping Criteria), максимальний фізичний час (Maximum Physical Time) – 2,5 секунди, максимальна кількість кроків (Maximum Steps) вимкнена, максимальна кількість внутрішніх ітерацій (Maximum Inner Iterations) – 1. Параметри руху поршня: зсув (Translation), швидкість зсуву (Translation Velocity) – [0.0, 0.0, \$Time < 1.5 ? -0.05 : 0.05\$].

В результаті моделювання створено графік залежності сили, що діє на поршень від деформації суміші зерна і дві сцени візуалізації. Сцена відображення розподілу сил, що діють на зерно наведена на рис. 2. Сцена – скалярна. Функція – Compression Force. На сцені повинна відображатися анотація (Annotations): Solution Time, grain. Анотація grain створюється користувачем зі створеного звіту.

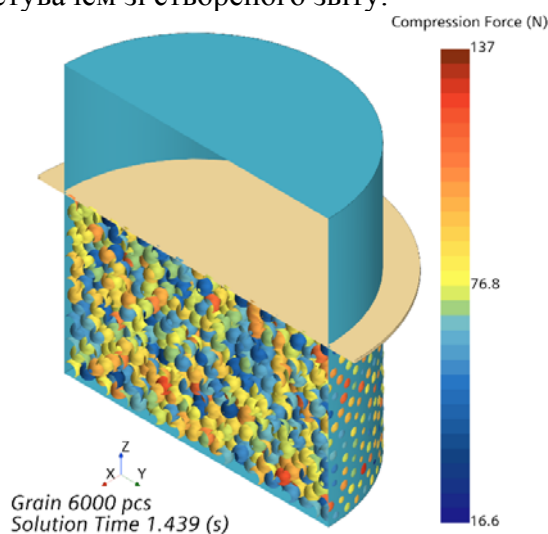


Рисунок 2 – Загальний вигляд сцени відображення розподілу сил  $F$ , що діють на зерно

Джерело: розроблено автором

Для подальшої оцінки процесу було створено три звіти. Перший з них – grain – містить інформацію про кількість елементів (Element Count), розділену на частини, які називаються «зерно» (grain). Звідси генерується анотація (Annotations) з назвою «grain». У текстових параметрах (Text) необхідно вказати «Grain \$grainReport шт.» (Grain \$grainReport pcs.), щоб вказати кількість елементів у звіті. Другий звіт – position – підсумковий звіт (Sum report). Функція поля (Field Function) – Position[Z]. Частина (Parts) – plunger: force. Третій звіт – force – підсумковий звіт (Sum report). Функція поля (Field Function) – Average DEM Total Force[k]. Частина (Parts) – plunger: force. З другого і третього звіту створюються монітори і єдиний графік (plot). Графік налаштовується таким чином, щоб його вигляд був, як на рис. 3.

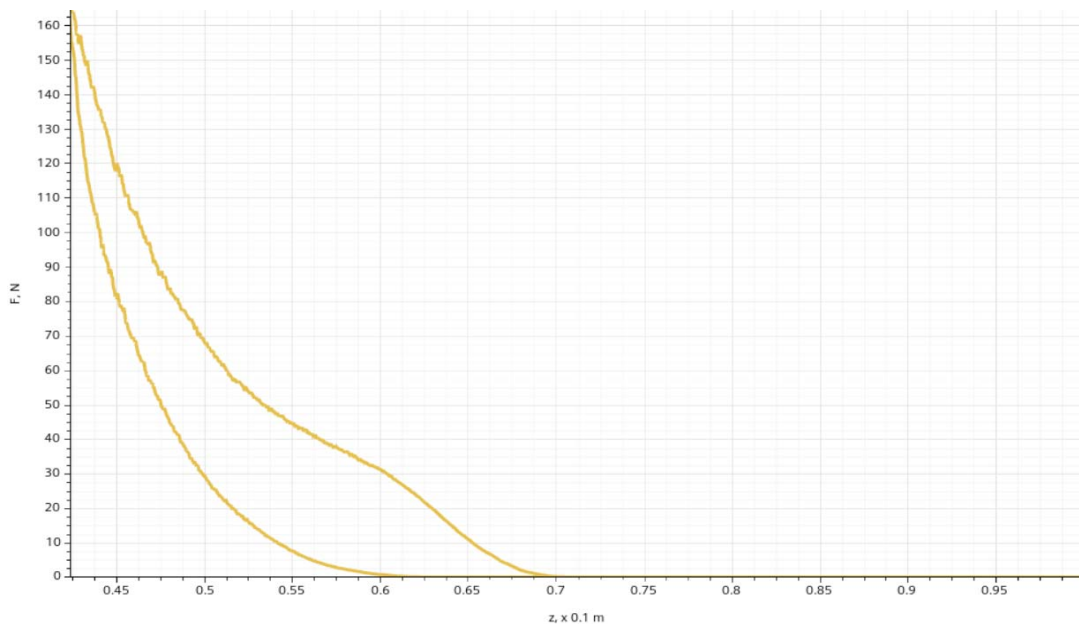


Рисунок 3 – Графік залежності сили, що діє на поршень від деформації суміші зерна

Джерело: розроблено автором

В якості першого критерію оцінки процесу обрано площу  $s$ , яка знаходиться всередині петлі пружного гістерезису. Її фізична сутність полягає в тому, що вона чисельно дорівнює незворотній питомій енергії (роботі), що перетворюється при виконанні кожного циклу деформації на теплову енергію. Для розрахунку площі  $s$  необхідно імпортувати отримані дані в формат .csv із зазначенням способу розділення – табуляція (tab). Далі отримані дані обробити в програмному пакеті Excel і визначити величину  $s$ .

В якості другого критерію оцінки процесу обрано максимальне значення сили  $F_{0,25}$  при 25 % відносній деформації, що діє на зерно. Це максимальне значення сили  $F$  визначають зі сцени відображення розподілу сил (рис. 2).

В якості факторів дослідження приймаємо наступні фізико-механічні властивості зерна: щільність (Density)  $\rho$ , коефіцієнт Пуассона (Poisson's Ratio)  $\mu$ , модуль Юнга (Young's Modulus)  $E$ . Рівні і межі варіювання факторами в залежності від варіанту наведено в табл. 1.

У плані досліджень передбачається варіювання трьома рівнями трьох факторів дослідження. Для кожного досліду збережено зображення сцени відображення розподілу сил і графіки залежності сили, що діє на поршень від деформації суміші зерна. Окрім цього сформована узагальнена таблиця із значенням площі  $s$ , яка

знаходиться всередині петлі пружного гістерезису і максимальне значення сили  $F_{0,25}$ , що діє на зерно.

Таблиця 1 – Рівні і межі варіювання факторами досліджень

Факторний рівень	Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> ( $x_1$ )	Коефіцієнт Пуассона $\mu$ ( $x_2$ )	Модуль Юнга $E$ , МПа ( $x_3$ )
-1	700	0,15	2,0
0	900	0,25	3,0
+1	1100	0,35	4,0
Інтервал	200	0,10	1,0

Джерело: розроблено автором

Далі складено програму розрахунку рівняння регресії в програмному пакеті Wolfram Cloud.

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud встановлені рівняння регресії зміни площі  $s$ , яка знаходиться всередині петлі пружного гістерезису і максимального значення сили  $F_{0,25}$  від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$s = 319,698 + 8,01092 x_1 - 7,26438 x_1^2 - 1,32561 x_2 - 0,932975 x_1 x_2 - 9,43986 x_2^2 + 77,2427 x_3 - 5,18492 x_1 x_3 + 2,21562 x_2 x_3 - 2,73488 x_3^2, \quad (1)$$

$$F_{0,25} = 735,233 + 9,43613 x_1 - 2,34149 x_1^2 + 36,2932 x_2 + 0,325733 x_1 x_2 + 14,4768 x_2^2 + 230,609 x_3 - 0,141617 x_1 x_3 + 11,6366 x_2 x_3 + 3,04546 x_3^2. \quad (2)$$

Результати статистичної обробки рівнянь (1) і (2) представлено в табл. 2 і 3 відповідно.

Таблиця 2 – Результати статистичної обробки рівняння регресії (1)

Коефіцієнт регресії	Значення	Стандартна помилка	t-критерій Стьюдента	P-рівень значущості
$a_{00}$	319,698	10,875	88,1928	$5,12517 \cdot 10^{-16}$
$a_{10}$	8,01092	5,03413	4,77396	0,12996
$a_{20}$	-1,32561	5,03413	-0,78997	0,795466
$a_{30}$	77,2427	5,03413	46,0314	$2,15982 \cdot 10^{-11}$
$a_{12}$	-0,932975	6,16552	-0,45396	0,881503
$a_{13}$	-5,18492	6,16552	-2,52286	0,412047
$a_{23}$	2,21562	6,16552	1,078071	0,723753
$a_{11}$	-7,26438	8,71936	-2,4994	0,416323
$a_{22}$	-9,43986	8,71936	-3,24789	0,29409
$a_{33}$	-2,73488	8,71936	-0,94097	0,757598

Джерело: розроблено автором

Провівши порівняння розрахованого критерію Стьюдента із табличним значенням  $t_{0,05}(27) = 2,05$  проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії:

$$s = 319,698 + 8,01092 x_1 - 7,2643 x_1^2 - 9,43986 x_2^2 + 77,2427 x_3 - 5,1849 x_1 x_3, \quad (3)$$

$$F_{0,25} = 735,233 + 9,4361 x_1 + 36,293 x_2 + 14,477 x_2^2 + 230,61 x_3 + 11,636 x_2 x_3. \quad (4)$$

Розкодуємо рівняння (3) і (4):

$$s = -224,178 + 100,575 E + 0,444725 \rho - 0,0259246 E \rho - 0,000181609 \rho^2 + 471,993 \mu - 943,986 \mu^2, \quad (5)$$

$$F_{0,25} = 87,9644 + 201,518 E + 0,0471806 \rho - 710,005 \mu + 116,366 E \mu + 1447,68 \mu^2. \quad (6)$$

Графіки рівнянь (5) і (6) приведені на рис. 4.

Таблиця 3 – Результати статистичної обробки рівняння регресії (2)

Коефіцієнт регресії	Значення	Стандартна помилка	t-критерій Стьюдента	P-рівень значущості
$a_{00}$	735,233	5,68605	129,305	$6,88896 \cdot 10^{-27}$
$a_{10}$	9,43613	2,63213	3,58498	0,00228212
$a_{20}$	36,2932	2,63213	13,7885	$1,16888 \cdot 10^{-10}$
$a_{30}$	230,609	2,63213	87,6131	$5,10195 \cdot 10^{-24}$
$a_{12}$	0,325733	3,22369	0,101044	0,920698
$a_{13}$	-0,141617	3,22369	-0,04393	0,965472
$a_{23}$	11,6366	3,22369	3,60972	0,00216278
$a_{11}$	-2,34149	4,55899	-0,5136	0,614142
$a_{22}$	14,4768	4,55899	3,17544	0,00553222
$a_{33}$	3,04546	4,55899	0,668012	0,513094

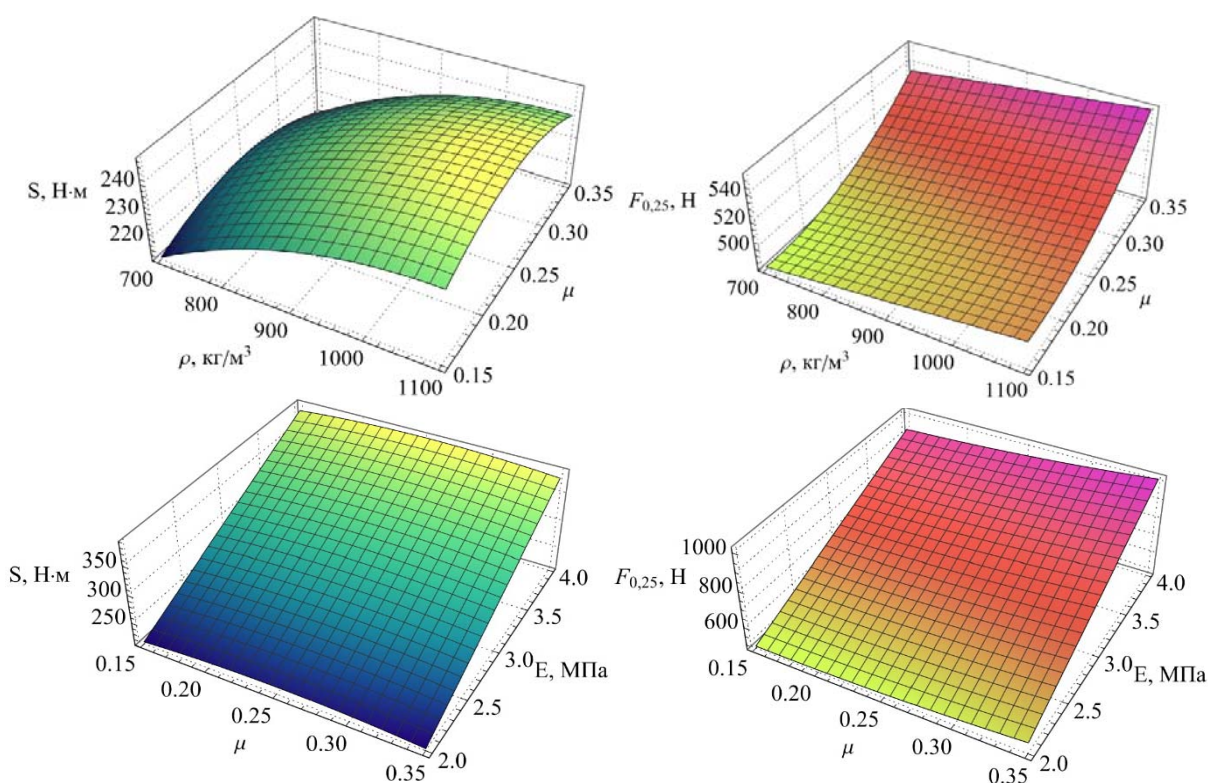


Рисунок 4 – Графіки залежності площі петлі пружного гістерезису  $s$  і максимального значення сили при 25 % відносній деформації зернового матеріалу  $F_{0,25}$  від його фізико-механічних властивостей

Джерело: розроблено автором

Аналіз рис. 4 і рівнянь (5) і (6) дає змогу стверджувати, що зі збільшенням щільності зернового матеріалу  $\rho$  і модуля Юнга  $E$  площа петлі пружного гістерезису  $s$  і максимальне значення сили при 25 % відносній деформації зернового матеріалу  $F_{0,25}$  збільшується. Для коефіцієнта Пуассона  $\mu$  зернового матеріалу спостерігається цікавий характер залежності. Так сила  $F_{0,25}$  збільшується зі збільшенням коефіцієнта Пуассона  $\mu$ , а площа петлі пружного гістерезису  $s$  має максимальне значення 212,5 Н·м при  $\mu = 0,23$ . Петля пружного гістерезису відображає поведінку матеріалу при циклічному навантаженні, коли відбуваються зміни деформації та напруження. Площа петлі  $s$  є мірою втрат енергії матеріалом, які відбуваються під час циклічного навантаження.



Таким чином, рівняння (5) можна використовувати для розрахунку площі петлі пружного гістерезису для різних зернових матеріалів з різними значеннями щільності, коефіцієнта Пуассона та модуля Юнга.

**Висновки.** В результаті чисельного моделювання процесу деформації сипкого матеріалу (на прикладі зернового матеріалу) отримані рівняння регресії другого порядку залежностей площі петлі пружного гістерезису  $s$  і максимального значення сили при 25 % відносній деформації зернового матеріалу  $F_{0,25}$  від його фізико-механічних властивостей (щільність  $\rho$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu$  і модуль Юнга  $E$ ). Представлені результати можуть бути використані при подальшому моделюванні або при створенні фізико-математичних моделей процесу стискання зернового матеріалу в грануляторах, екструдерах та експандерах.

## Список літератури

1. Дідух Л.Д. Механіка: підручник. Тернопіль: підр. і посіб., 2016. 428 с.
2. Faraji G., Kim H.S., Kashi H.T. Chapter 2 – Severe Plastic Deformation Methods for Bulk Samples. Severe Plastic Deformation. Methods. Processing and Properties, 2018. P. 37-112. Doi: 10.1016/B978-0-12-813518-1.00002-3
3. Perez-Gonzalez E.L., Bilodeau J.-P., Dore G. Analysis model for permanent deformation in granular materials under the action of superheavy vehicles. Transportation Geotechnics. 2021. Vol. 28. 100536. Doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100536
4. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підр. / О.М. Царенко та ін.; за ред. Яцуна С.С. К.: Мета, 2003. 448 с.
5. Івлєв В.В. Дослідження явища пружного гістерезису під час ударно-механічної взаємодії грубої овечої вовни. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: зб. наук праць УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого*. 2018. Вип. 22 (36). С. 259-263.
6. Дослідження динаміки деформації зволоженої грубої овечої вовни при ущільненні / Е.Б. Алієв, В.В. Лиходід, В.М. Забудченко, В.В. Івлєв. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук праць Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2015. Вип. 28. С. 132-138.
7. Лабатюк Ю., Алієв Е. Розрахунок сили опору деформації ґрунту під дією робочого органа глибокорозпушувача. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 46-52.
8. Чисельні методи: навч. посіб. / Л.О. Волонтир, О.В. Зелінська, Н.А. Потапова, І.А. Чіков. Вінниця: ВНАУ, 2020. 322 с.
9. Simcenter STAR-CCM+ 2021.3. Verification Suite, 2021. 333 p.
10. Stillinger, Frank H.; Lubachevsky, Boris D. Crystalline-amorphous interface packings for disks and spheres. *Journal of Statistical Physics*. 1993. 73 (3–4): 497–514. Doi: 10.1007/bf01054337.
11. Банніков Д.О., Тютькін О.Л. Перспективні напрями розвитку механіки сипучого середовища. *Наука та інновації* – . 2020. Т. 16, № 2. С. 45-54. Doi: 10.15407/scin16.02.045.
12. Алієв Е.Б. Динаміка деформації розтягування руна грубої овечої вовни. *Вісник Степу. Стан та перспективи розвитку агропромислового виробництва України : наук. зб.* 2015. Вип. 12. С. 169-171.
13. Franklin S.V., Shattuck M.D. Handbook of Granular Materials. CRC Press, 2015. 522 p. Doi: 10.1201/b19291
14. Aliiev E., Dudin V., Linko M. Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics*. 2022. 13(3). Pp. 9-16. Doi: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16

## References

1. Didukh, L.D. (2016). *Mekhanika: pidruchnyk [Mechanics: a textbook]*. Ternopil': Pidruchnyky i posibnyky [in Ukrainian].
2. Faraji, G., Kim, H.S. & Kashi, H.T. (2018). Chapter 2 – Severe Plastic Deformation Methods for Bulk Samples. Severe Plastic Deformation. Methods. Processing and Properties. P. 37-112. Doi: 10.1016/B978-0-12-813518-1.00002-3 [in English].

3. Perez-Gonzalez, E.L., Bilodeau, J.-P. & Dor, G. (2021). Analysis model for permanent deformation in granular materials under the action of superheavy vehicles. *Transportation Geotechnics, Vol. 28*, 100536. Doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100536 [in English].
4. Tsarenko, O.M., Voytyuk, D.H., Shvayko, V.M. et al. (2003). *Mekhaniko-tekhnologichni vlastyivosti sil's'kohospodars'kykh materialiv [Mechanical and technological properties of agricultural materials]*. S.S. Yatsuna (Eds). Kyiv: Meta [in Ukrainian].
5. Ivlyev, V.V. (2018). Doslidzhennya yavlyshcha pruzhnoho histerezy pid chas udarno-mekhanichnoyi vzayemodiyi hruboyi ovechoyi vovny [Study of the phenomenon of elastic hysteresis during shock-mechanical interaction of coarse sheep's wool]. *Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi tekhniki i tekhnolohiy dlya sil's'koho hospodarstva Ukrayiny : zb. nauk prats' UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho – Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture in Ukraine: coll. of Labor Sciences of UkrNDIPVT named after L. Pogorily, Issue 22 (36)*, 259-263. [in Ukrainian].
6. Aliiev, E.B., Lykhodid, V.V., Zabudchenko, V.M. & Ivlyev, V.V. (2015). Doslidzhennya dynamiky deformatsiyi zvolozhenoyi hruboyi ovechoyi vovny pry ushchil'nenni [Study of the dynamics of deformation of moistened coarse sheep's wool during compaction]. *Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya – Machinery in Agricultural Production, Industrial Engineering, Automation, Issue 28*, 132-138. [in Ukrainian].
7. Labatyuk, Yu. & Aliyev, E. (2014). Rozrakhunok syly oporu deformatsiyi gruntu pid diyeyu robochoho orhana hlybokorozpushuvacha [Calculation of the resistance force of soil deformation under the action of the working body of a deep loosener]. *Visnyk Lviv's'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu: ahroinzhenerni doslidzhennya – Bulletin of the Lviv National Agrarian University: agricultural engineering research, 18*, 46-52 [in Ukrainian].
8. Volontyr, L.O, Zelins'ka, O.V., Potapova, N.A. & Chikov, I.A (2020). *Chysel'ni metody: Navchal'nyy posibnyk [Numerical methods: Tutorial]*. Vinnytsya: VNAU [in Ukrainian].
9. Simcenter STAR-CCM+ 2021.3. Verification Suite. 2021. 333 p. [in English].
10. Stillinger, Frank H. & Lubachevsky, Boris D. (1993) Crystalline-amorphous interface packings for disks and spheres. *Journal of Statistical Physics. 73 (3–4)*: 497–514. Doi: 10.1007/bf01054337 [in English].
11. Bannikov, D.O &, Tyut'kin, O.L. (2020). Perspektyvni napryamy rozvytku mekhaniky sypuchoho seredovyscha [Prospective directions of development of the mechanics of bulk media]. *Nauka ta innovatsiyi – Science and Innovation, Vol. 16, № 2*, 45-54. Doi: 10.15407/scin16.02.045 [in Ukrainian].
12. Aliiev, E.B. (2015). Dynamika deformatsiyi roztyahuvannya runa hruboyi ovechoyi vovny [Dynamics of the deformation of the stretching of the fleece of coarse sheep's wool]. *Stan ta perspektyvy rozvytku ahropromysloвого vyrobnytstva Ukrayiny: Visnyk Stepu. Naukovyy zbirnyk – Herald of the Steppe. State and prospects of the development of agro-industrial production of Ukraine: Science. coll., Issue. 12*, 169-171. [in Ukrainian].
13. Franklin, S.V. & Shattuck, M.D. (2015). *Handbook of Granular Materials*. CRC Press. Doi: 10.1201/b19291 [in English].
14. Aliiev, E., Dudin, V. & Linko, M. (2022). Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics, 13(3)*, 9-16. Doi: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16 [in English].

**Vitalii Ivliev**, PhD tech sci.

*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine*

### **Numerical Modeling of Elastic Hysteresis of Loose Material**

The elastic hysteresis of bulk material is an important problem in many fields of science and technology, including mining and metallurgy, construction, energy, and engineering. This is due to the fact that loose materials consist of a large number of particles that can shift relative to each other under the influence of external loads. This process is accompanied by energy losses and changes in the shape of the material structure, which in turn leads to elastic hysteresis.

Knowledge of material behavior under various loading conditions is essential for developing safe and effective engineering solutions.

The purpose of the research is to determine the parameters of the deformation of loose material (for example, granular material) depending on its physical and mechanical properties in the Simcenter STAR-CCM+ software package.

The elastic hysteresis loop reflects the behavior of the material under cyclic loading, when strain and stress changes occur. Loop area is a measure of material energy losses that occur during cyclic loading.

As a result of numerical modeling of the process of deformation of loose material (on the example of granular material), the regression equations of the second order of the dependences of the area of the elastic

hysteresis loop and the maximum force value at 25% relative deformation of the granular material from its physical and mechanical properties (density, Poisson's ratio and Young's modulus) were obtained. The presented results can be used in further modeling or in the creation of physico-mathematical models of the process of compression of grain material in granulators, extruders and expanders.

**bulk material, grain, compression, force, deformation, elastic hysteresis, modeling, simulation**

*Одержано (Received) 16.05.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.05.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023*

УДК 631.362

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.67-74](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.67-74)

**Е.Б. Алієв**, проф., д-р техн. наук, ст.дослідник, **К.О. Лупко**, здобувачка третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти  
*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна*  
*e-mail: aliev@meta.ua*

## Результати експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра

Метою є експериментальне обґрунтування основних параметрів та режимів роботи селекційно-насінницького трієра дрібнонасінневих культур, розробка алгоритму роботи і програмного забезпечення відповідної мехатронної системи. Для проведення експериментальних досліджень розроблено й створено лабораторний селекційно-насінницький трієр. Для зміни частоти обертання циліндра і напрямку обертання використано плату керування Arduino UNO і драйвер електродвигуна постійного струму L298N. Керувати частотою і напрямком обертання циліндра можна в ручному режимі з використанням потенціометра і автоматичному з використанням монітор-порту Arduino IDE. Робочим органом трієра є циліндр, який складається з пластин із чарунками. В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на лабораторному циліндричному чарунковому трієрі отримано залежності зміни мінімального  $\theta_{\min}$  і максимального  $\theta_{\max}$  кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння  $M_0$ , частоти обертання циліндра  $n$  та вмісту домішок  $f_0$ . Отримані залежності увійшли до програмного забезпечення системи керування мехатронної системи, яке дозволяє налаштувати положення лотка для збору насіння в результаті керування сервоприводом.

**насіння, домішки, очищення, розділення, сепарація, трієр, параметри, керування, мехатронна система, насіння, ефективність**

**Постановка проблеми.** Однією з важливих задач агропромислового виробництва є розширення асортименту насінневого матеріалу, щоб задовольнити зростаючі потреби різних фермерських господарств. Однак при досягненні певного рівня виробництва насінневого матеріалу виникає перевантаження на насіннеочисну техніку, що призводить до порушення технології потокової післязбиральної обробки насіння [1, 2].

Якість обробленого насінневого матеріалу в значній мірі залежить від відповідності технічних засобів об'єму та раціональної технології післязбиральної обробки насіння [3]. Існуючі технологічні лінії для обробки насіння не забезпечують можливості відбору високоякісного насіння без додаткових витрат та ефективність його очищення від домішок за довжиною.

**ЗМІСТ****Комп'ютерна інженерія**

- В.В. Смірнов, Н.В. Смірнова*  
Мобільна mesh-мережа для управління роєм об'єктів..... 3
- Р.М. Минайленко, О.М. Дреєв, О.К. Коноплицька-Слободенюк, В.А. Резніченко*  
Застосування мікроконтролера Raspberry Pi для управління  
та моніторингу IoT систем ..... 12

**Прикладна механіка**

- Т.В. Гайкова, Д.М. Ковальчук, Р.М. Гайков*  
Аналіз науково-технічних інновацій в галузі машинобудування з виявленням  
закономірності впливу технологічних параметрів..... 19
- М.О. Годунко, О.А. Кислун, В.А.Мажара, В.К. Щербина, Р.А. Кравченко,  
В.В. Ключкін*  
Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого  
захватного пристрою..... 27

**Матеріалознавство**

- В.М. Кропівний, М.В. Босий, О.В. Кузик, А.В. Кропівна, Л.А. Молокост*  
До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні  
діаграм стану систем «Fe-Si», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg»..... 34

**Галузеве машинобудування**

- О.І. Скібінський, А.О. Гнатюк, М.О. Годунко, Д.В. Богатирьов,  
В.М. Селехова*  
Синтез профілю зубчатих коліс малошумного шестеренного насоса  
з низькою пульсацією ..... 43
- А. Р. Апаракін*  
Модульно-параметричний принцип розробки проектів шестеренних  
гідравлічних машин ..... 51

**Агроінженерія**

- В. В. Івлєв*  
Чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу ..... 59
- Е. Б. Алієв, К. О. Лупко*  
Результати експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра..... 67
- В. С. Кошулько, Ю. О. Чурсінов, Н. А. Сова*  
Результати дослідження процесу віброударної сепарації вівса на кормові цілі ..... 75
- О. В. Козаченко, М. В. Бакум, А. Д. Михайлов, М. М. Крекот, О. С. Чала,  
О.І. Завгородній*  
Підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного  
на вібраційній насіннеочисній машині ..... 83

*О.В. Нестеренко, О.М. Васильковський, Р.В. Кісільов*  
Directions for Improvement of Feeding Devices of Pneumatic Separating Channels ..... 90

#### **Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології**

*Sergey Osadchy, Larisa Vikhrova, Mariya Miroshnichenko, Valentin Soldatenko*  
Information technology for Synthesizing a Grain Mass Flow Multidimensional  
Optimal Stabilization System with Perturbation Feedback ..... 98

*О.В. Щербак, А.В. Сумінов, С.Л. Хачатурян*  
Дослідження динамічних навантажень рами фронтального навантажувача  
з використанням комп'ютерних 3D моделей у середовищі Siemens NX ..... 104

*Н.Ю. Гарасьова, А.І. Котиш, В.П. Солдатенко, В.В. Зінзура*  
Моделювання перехідних процесів в синхронному генераторі при  
витковому замиканні обмотки статора ..... 113

#### **Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

*І.В. Савеленко, К.Г. Петрова, А.І. Котиш, О.І. Сіріков*  
Оптимізація параметрів мікроклімату в навчальних закладах з системами  
локальної рекуперації повітря..... 123

#### **Автомобільний транспорт**

*Т.В. Гайкова, О.А. Мурашко*  
Сприяння впровадженню електромобілів як науково-технічна інновація  
в галузі автомобільного транспорту ..... 130

*А.В. Йовченко, І.А. Шльончак*  
Розробка алгоритма моніторингу стану водія за допомогою Android-  
застосунку з метою підвищення рівня активної безпеки ..... 139

*І.О. Хітров*  
Аналіз конструкції кузова вантажного транспортного засобу ..... 146

*Ю.В. Дзядикевич, Ю.М. Петришин, М.Р. Башуцький, М.В. Буряк*  
Дослідження захисту деталей автомобілів від високотемпературного  
окислення ..... 153

*В.Б. Захарчук, В.В. Кудінов, І.В. Кудінов, В.В. Бірючинський*  
Вплив експлуатаційних факторів на залишковий ресурс металоконструкцій  
колісних транспортних засобів ..... 159

*В.В. Аулін, О.Л. Ляшук, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко, В.З. Гудь, В.О. Тесля*  
Теоретико-методичні засади підвищення ефективності використання  
парку машин в регіональних транспортних системах та підприємствах  
на основі лізингових відносин ..... 165

*Ів.Б. Гевко, Ю.І. Пиндус, М.Г. Левкович, В.О. Тесля, А.Б. Гупка, М.Д. Сіправська*  
Дослідження напружено-деформованого стану дна кузова напівпричіпа  
вантажного автомобіля в залежності від розміщення перемичок ..... 180

**Будівництво та цивільна інженерія**

*І.О. Скриннік, М.О. Федотова, В.В. Дарієнко, С.О. Джирма*  
 Досвід та тенденції розвитку монолітного будівництва при зведенні  
 будівель та споруд..... 190

*І.О. Скриннік, М.О. Федотова, В.В. Дарієнко, О.А. Кислун, Є.О. Томаченко*  
 Досвід використання сучасної опалубки при зведенні монолітних будинків  
 в місті Кропивницькому ..... 196

*О.В. Дроботя*  
 Експериментальні випробування попередньо напружених несучих  
 елементів огорожувальних конструкцій з холодноформованих сталевих  
 профілів на косий згин..... 204

**Транспортні технології (за видами)**

*В. Г. Загорянський*  
 Ергономічне забезпечення вимог до комфортності поїздки в міському  
 автобусі великої місткості ..... 213

*А. Г. Кравцов, Т. Ф. Ларіна, О. М. Горяїнов, А.С. Козенок, Т.Е. Городецька,  
 І.А. Бабич*  
 Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на ділянках  
 дорожньої мережі ..... 222

*І.А. Шльончак, А.П. Солтус, М.П. Рудь*  
 Аналіз можливості застосування технології blockchain у сфері управління  
 ланцюгами постачань..... 231

*І.О. Кузєв*  
 Гібридні конструкції балок на транспорті із застосуванням металу ..... 237

*П.В. Попович, М.М. Маяк, Р.І. Розум, М.В. Буряк, К.М. Березька,  
 Ю.Б. Коваль, С.А. Мишко*  
 Дослідження стану транспортної інфраструктури міста Тернополя ..... 243

*П.В. Попович, Р.І. Розум, І.С. Мурований, М.В. Буряк, К.М. Березька,  
 Н.А. Петринюк, І.О. Лоїк*  
 Дослідження безпеки дорожнього руху у м. Тернополі..... 249

*Natalia Rozhko, Oleg Tson, Uliana Plekan, Anatolii Matviishyn, Bogdan Gevko*  
 The Use of Network Intralogistics and Fulfillment for the Functioning  
 of Transport and Warehouse Complexes ..... 257