

ISSN 2078-4481

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# ВІСНИК

ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

## 2(93)

Частина 1

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Херсонського національного технічного університету  
(протокол № 12 від 05.06.2025 року)

---

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України  
категорії «Б» зі спеціальностей: С1, D1, D2, D3, D5, D7, J3  
(Наказ МОН України від 17.03.2020 № 409);  
D4 (Наказ МОН України від 29.06.2021 № 735);  
J5, J6, J7, J8, F2, F3, F5, F6, F7, G7, G8, G9, G11  
(Наказ МОН України від 02.07.2020 № 886);  
G1, G3, G4, G15 (Наказ МОН України від 24.09.2020 № 1188)

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:  
GoogleScholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2025

## Редакційна колегія

### Головний редактор

Литвиненко В. І.

д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук,  
заслужений діяч науки і техніки України

### Заступник головного редактора

Сарібськова Ю. Г.

д.т.н., професор

Шерстюк В. Г.

д.т.н., професор, проректор з навчальної роботи

### Відповідальний секретар

Лур'є І. А.

к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук

## Члени редакційної колегії

Баганов Є. О.	к.т.н., доцент
Березовський Ю. В.	д.т.н., доцент
Бойко Г. А.	к.т.н., доцент
Вороненко М. О.	к.т.н., доцент
Гончар О. І.	д.е.н., професор
Горбачов П. Ф.	д.т.н., професор
Дімітрова В.	д.н., доцент
Джерелюк Ю. О.	д.е.н., професор
Євтушенко В. В.	к.т.н., доцент
Жарікова М. В.	д.т.н., професор
Зубкова К. В.	к.т.н., доцент
Корчевська Л. О.	д.е.н., професор
Кузьміна Т. О.	д.т.н., професор
Кунік О. М.	к.т.н., доцент
Луб'яний П. В.	к.т.н., доцент
Наумов О. Б.	д.е.н., професор
Олійник Н. М.	к.т.н., доцент
Плющ Р. М.	д.держ.упр., професор
Половцев О. В.	д.держ.упр., к.т.н., професор
Рудакова Г. В.	д.т.н., професор
Русанов С. А.	к.т.н., доцент
Савін С. Ю.	д.е.н., доцент
Салєба Л. В.	к.т.н., доцент
Семешко О. Я.	д.т.н., професор
Сідельникова Л. П.	д.е.н., професор
Smolarz A. (Польща)	dr.hab.inz.
Стоянова О. В.	к.т.н., доцент
Топалова Е. Х.	к.держ.упр., доцент
Філіппова В. Д.	д.держ.упр., професор
Хрущ Н. А.	д.е.н., професор
Чепелюк О. В.	д.т.н., професор
Шандова Н. В.	д.е.н., професор
Шарко О. В.	д.т.н., професор
Шарко М. В.	д.е.н., професор
Шевченко І. І.	д.т.н., професор

**ISSN 2078-4481**

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY**

**VISNYK**

**OF KHERSON NATIONAL  
TECHNICAL UNIVERSITY**

**2(93)**

**Part 1**

Recommended for publication by the Academic Council  
of Kherson National Technical University  
(Minutes № 12 on 5th June 2025)

---

The journal is included in the List of Scientific Professional Editions of Ukraine Category "B"  
in specialties: C1, D1, D2, D3, D5, D7, J3

(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 17.03.2020, № 409);

D4 (Ukraine Education and Science Ministry Order dated 29.06.2021, № 735);

J5, J6, J7, J8, F2, F3, F5, F6, F7, G7, G8, G9, G11

(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 02.07.2020, № 886);

G1, G3, G4, G15

(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 24.09.2020, № 1188)

The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories:

Google Scholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)



Publishing House  
"Helvetica"  
2025

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

Litvinenko V. I.

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Informatics and Computer Science, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

### Deputy Editor-in-Chief

Saribekova Yu. G.

Doctor of Engineering Science, Professor

Sherstiuk V. H.

DSc (Engineering), Professor, Vice-Rector for Academic Affairs

### Executive Secretary

Lurie I. Yu.

PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Educational and Methodical Department, Associate Professor of the Department of Informatics and Computer Sciences

### Members of Editorial Board

<b>Baganov Ye. O.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Berezovsky Yu. V.</b>	Doctor of Engineering Science, Associate Professor
<b>Boiko H. A.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Voronenko M. O.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Honchar O. I.</b>	Doctor of Economic Sciences, Professor
<b>Horbachov P. F.</b>	Doctor of Economics, Professor
<b>Dimitrova V. Ya.</b> (Bulgaria)	Ph.D., Associate Professor
<b>Dzhereliuk Yu. A.</b>	Doctor of Economics, Professor
<b>Yevtushenko V. V.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Zharikova M. V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Zubkova K. V.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Korchevska L. A.</b>	Doctor of Economics, Professor
<b>Kuzmina T. O.</b>	Doctor of Technical Sciences, Professor
<b>Kunyk O. N.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Lubianyi P. V.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Naumov O. B.</b>	Doctor of Economics, Professor
<b>Oliinyk N. M.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Pliushch R. M.</b>	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
<b>Polovtsev O. V.</b>	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
<b>Rudakova H. V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Rusanov S. A.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Savin S. Yu.</b>	Doctor of Economics, Associate Professor
<b>Saleba L. V.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Semeshko O. Ya.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Sidelnikova L. P.</b>	Doctor of Economics, Professor
<b>Smolarz A.</b> (Poland)	Ph.D., Associate Professor
<b>Stoianova O. V.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Topalova E. K.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Filippova V. D.</b>	Doctor of Science in Public Administration, Professor
<b>Khrushch N. A.</b>	Doctor of Economics, Professor
<b>Chepeliuk O. V.</b>	Doctor of Technical Sciences, Professor
<b>Shandova N. V.</b>	Doctor of Economics, Professor
<b>Sharko M. V.</b>	Doctor of Economics, Professor
<b>Sharko O. V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Shevchenko I. I.</b>	Doctor of Technical Sciences, Professor

## ЗМІСТ

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

<b>М. С. Андрєєв, Г. С. Столяренко</b> Синтез біопалива на основі тригліцеридів рослинного походження з використанням метилового та етилового спиртів.....	11
<b>А. В. Антонєць, О. М. Іванов, С. В. Кучеренко, Б. М. Ярошенко</b> Дослідження контрольованого руху зерна по трьом регульованим полицям каскадної установки.....	18
<b>В. С. Волошин, В. А. Бурко</b> Термодинамічний підхід та використання резонансної енергії для мінімізації відходів у харчовій промисловості.....	25
<b>Н. О. Горохівський, В. М. Власовець</b> Аналіз сучасних підходів до забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей у роботизованих виробничих системах.....	32
<b>А. Г. Данилкович, О. А. Охмат</b> Хромошадне дублення шкіряного напівфабрикату для виготовлення еластичної шкіри.....	41
<b>А. О. Деркаченко, О. В. Поливода</b> Автоматизована система діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів з використанням сферичного паралельного механізму.....	48
<b>Д. О. Дмитрієв, М. Ф. Кузмичов</b> Вплив постобробки на якість деталей в адитивному виробництві.....	56
<b>Н. Л. Дон, І. Ф. Погребняк</b> Моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції для автомобільної стоянки.....	62
<b>В. О. Зубенко, Р. В. Телюта</b> Система захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення.....	67
<b>О. В. Канівець, В. В. Дудник, І. М. Канівець, Н. М. Опара, Ю. В. Шкляр</b> Обґрунтування математичної моделі поверхневого зміцнення шляхом обкатки циліндричних поверхонь.....	73
<b>О. В. Канівець, І. М. Канівець, О. У. Дрожжана, Н. М. Опара, В. В. Дудник</b> Безпека життєдіяльності в аграрному секторі: реалізація математичної моделі машинного зору для виявлення пожеж на полях.....	80
<b>О. В. Кириллова, В. Л. Ромах</b> Трансформація ринку глобальних операторів контейнерних терміналів у контексті інтернаціоналізації, регіоналізації та цифрової адаптації.....	88
<b>Є. В. Корбут, В. С. Парненко, О. А. Плівак, Т. П. Ніколаєнко</b> Визначення розмірів дискретних ділянок покриття інструменту для обробки полімерних композитів.....	102
<b>В. В. Курак, О. В. Андропова, Є. О. Баганов, І. Ф. Погребняк</b> Система зовнішнього освітлення з пріоритетним живленням від джерела постійної напруги.....	111
<b>М. С. Кучук, О. Р. Белянська, О. В. Кравченко, О. І. Онопрієнко, Л. В. Ващенко</b> Дослідження технології очищення забарвлених розчинів при активуванні диспергуванням кисень-водневих процесів із наступною адсорбцією.....	117
<b>О. М. Лебедь</b> Оцінка якості роботи напівпровідникового перетворювача частоти суднового електротехнічного комплексу на базі нечіткої логіки.....	125
<b>О. М. Лебедь, Н. І. Лебедь</b> Керування параметрами хитавиці судна на основі активних цистерн з використанням математичного апарату нечіткої логіки.....	131
<b>В. О. Лукаш</b> Порівняльний аналіз традиційних і сучасних способів сушіння зерна: класифікація та перспективи розвитку....	137
<b>А. В. Макатьора, Д. А. Макатьора, М. А. Зенкін, В. О. Кохановський, А. І. Карпешко</b> Функціонально-конструктивний вплив ножа з рифлями на процес повздовжнього різання монолітної гуми.....	142

**А. В. АНТОНЕЦЬ**

кандидат педагогічних наук, доцент,  
доцент кафедри будівництва та професійної освіти  
Полтавський державний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-2332-6711

**О. М. ІВАНОВ**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри будівництва та професійної освіти  
Полтавський державний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-1761-9913

**С. В. КУЧЕРЕНКО**

аспірант кафедри механічної та електричної інженерії  
Полтавський державний аграрний університет  
ORCID: 0009-0009-2308-0182

**Б. М. ЯРОШЕНКО**

аспірант кафедри механічної та електричної інженерії  
Полтавський державний аграрний університет  
ORCID: 0009-0006-0169-1909

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТРОЛЬОВАНОГО РУХУ ЗЕРНА ПО ТРЬОМ РЕГУЛЬОВАНИМ ПОЛИЦЯМ КАСКАДНОЇ УСТАНОВКИ

У даній роботі виконано дослідження гравітаційного руху зернової маси по полицях каскадної установки направлене на розробку та обґрунтування аналітичної моделі контрольованого гравітаційного руху зерна по трьом регульованим пересипним ділянкам з відповідними співвідношеннями кутів їх нахилу.

При завантаженні падаюче зі значної висоти зерно ударяючись об дно та стінки ємності може травмуватися. Зазначена проблема потребує розробки та дослідження технічного рішення яке б забезпечувало регулювання швидкості руху зерна при його завантаженні у ємності. Пристрої, які призначаються для зменшення і стабілізації швидкості завантаження повинні бути не складними у їх виготовленні та експлуатації. Запропонована модель враховує початкову висоту падіння зерна на першу розгінну ділянку, висоту падіння зерна з однієї полиці на іншу, довжини пересипних полиць, а також коефіцієнт тертя між шаром зерна та матеріалом полиць.

На основі розробленої аналітичної моделі руху зерна та запропонованих рівнянь для знаходження співвідношень між трьома кутами нахилу пересипних полиць була запропонована принципова схема гравітаційної установки із трьох полиць. Полиці можуть вільно повертатись на осях на необхідний кут відносно горизонтальної площини. Для першої полиці кут нахилу  $\alpha$  вибирався з варіативного ряду  $45^\circ, 55^\circ, 65^\circ$  та  $75^\circ$ . Для кута  $\beta$  максимальна його варіація не перевищує  $0,59^\circ$ , а кут  $\gamma$  змінюється в максимальній своїй величині на  $1,4^\circ$ . В той же час різниця між значеннями кута  $\gamma$  для різних діапазонів може відрізнятися більше ніж  $10^\circ$ . Отримані результати та їх аналіз свідчать про те, що представлена аналітична модель та відповідна гравітаційно-каскадна установка за рахунок трьох ділянок дозволяє вирішити проблему контрольованого руху швидкості зерна для його завантаження у ємності без травмування.

**Ключові слова:** аналітична модель руху зерна, каскадна установка, три пересипні полиці, кути нахилу.

**A. V. ANTONETS**

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Construction and Vocational Education  
Poltava State Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-2332-6711

**O. M. IVANOV**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Construction and Vocational Education  
Poltava State Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-1761-9913

S. V. KUCHERENKO

Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering  
Poltava State Agrarian University  
ORCID: 0009-0009-2308-0182

B. M. YAROSHENKO

Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering  
Poltava State Agrarian University  
ORCID: 0009-0006-0169-1909

## THE RESEARCH OF CONTROLLED GRAIN MOVEMENT ON THREE ADJUSTABLE SHELVES OF A CASCADE INSTALLATION

*In this work, a study of the gravitational movement of grain mass along the shelves of a cascade installation was carried out, aimed at developing and substantiating an analytical model of controlled gravitational movement of grain along three adjustable transfer sections with the corresponding ratios of their inclination angles.*

*When loading, grain falling from a considerable height, hitting the bottom and walls of the container, can be injured. This problem requires the development and study of a technical solution that would provide regulation of the speed of grain movement when loading it into the container. Devices designed to reduce and stabilize the loading speed should not be complicated in their manufacture and operation. The proposed model takes into account the initial height of the grain fall onto the first acceleration section, the height of the grain fall from one shelf to another, the length of the transfer shelves, as well as the friction coefficient between the grain layer and the material of the shelves.*

*Based on the developed analytical model of grain movement and the proposed equations for finding the relationships between the three angles of inclination of the transfer shelves, a schematic diagram of a gravity installation with three shelves was proposed. The shelves can freely rotate on their axes to the required angle relative to the horizontal plane. For the first shelf, the angle of inclination  $\alpha$  was chosen from the variational series of  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $65^\circ$  and  $75^\circ$ . For the angle  $\beta$ , its maximum variation does not exceed  $0.59^\circ$ , and the angle  $\gamma$  changes in its maximum value by  $1.4^\circ$ . At the same time, the difference between the values of the angle  $\gamma$  for different ranges can differ by more than  $10^\circ$ . The results obtained and their analysis indicate that the presented analytical model and the corresponding gravity-cascade installation due to three sections allow solving the problem of controlled grain velocity movement for loading it into containers without injury.*

**Key words:** analytical model of grain movement, cascade installation, three transfer shelves, inclination angles.

### Постановка проблеми

Для зберігання зерна на елеваторах використовують висотні металеві силоси з плоским бетонним дном. Завантаження зернової маси в силос з висоти 12...30 метрів призводить до підвищення кількості битих зернівок більше ніж у 8 разів [1], майже 80 % загальної деформації зерна відбувається на стадії первинного завантаження у силоси [2]. Таким чином, зниження ушкодження зернового вантажу на етапі завантаження його у силоси є важливою проблемою, необхідність якої обумовлена втратами зерна, що зберігається в силосах. Дана проблема потребує пошуку шляхів безпечного завантаження силосів зерном без його травмування. Варіантом подолання проблеми завантаження висотних силосів зерном без його травмування є створення каскадного завантажувального пристрою, що дозволяє здійснювати контроль швидкості руху зерна, під час його гравітаційного завантаження, та математично обґрунтувати його роботу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Певні дослідження щодо контрольованого руху зерна описані в роботах [3] та [4]. В [3] наведені залежності зміни швидкості руху зернового вантажу у похилому каналі з трьома змінними кутами. В даній статті зроблений опис установки, яка складається із прямолінійних ділянок виконаних у вигляді жолобів з яких одна ділянка розгінна, а дві інші гальмівні. В роботі [4] представлений периферійний відкритий гвинтовий канал з розгінною та гальмівною ділянками, що кріпиться на внутрішній боковій поверхні силосу для гравітаційного завантаження високих споруд зерном. Дослідження руху зернової маси по гвинтовій лінії описано також в роботі [5], де наведено рівняння руху матеріальної точки по поверхні спірального жолоба під дією сили тяжіння. В роботі [6] для зменшення травмування і рівномірного розподілення зерна пропонується використовувати тороподібну тарілку яка встановлюється в нижній частині гофрованого завантажувального рукава. Недоліком пристрою є розміри тарілки та складність її виготовлення. В [7] для рівномірного розподілу зерна проаналізовані завантажувальні пристрої котрі монтуються під горловиною силосу. Недоліком є травмування зерна силами інерції при ударі зерна об стінки ємності.

Отже, незважаючи на значну кількість пристроїв та досліджень присвячених питанням рівномірного та без ударного завантаження силосів зерновим матеріалом проблема завантаження висотних силосних споруд залишається актуальною і не в повній мірі вирішеною. Існуючі пристрої не в змозі контролювати і виконувати регулювання швидкості руху зернового матеріалу під час його гравітаційного завантаження, або є складними у їх

виготовленні та експлуатації. Тому, нагальною проблемою є необхідність розробки завантажувальної гравітаційно-каскадної установки, яка забезпечує контроль швидкості руху зерна за рахунок різних кутів нахилу полиць.

**Формулювання мети дослідження**

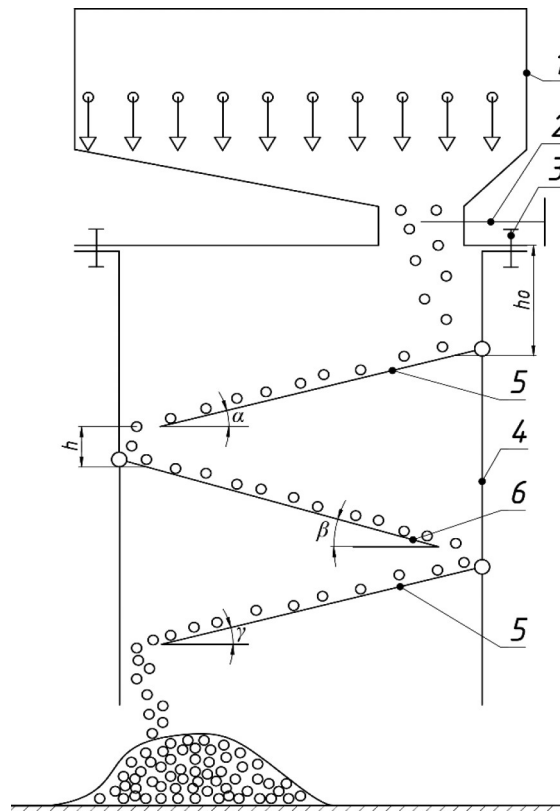
Розробка аналітичної моделі контрольованої швидкості руху зерна по трьом пересипним полицям завантажувальної гравітаційно-каскадної установки, що дасть змогу визначити її основні геометричні параметри та співвідношення між трьома кутами нахилу полиць.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

При проведенні теоретичних досліджень був застосований закон збереження енергії, перетворення та графічні визначення на основі використання законів теоретичної механіки.

Для аналізу руху зерна по трьом пересипним полицям запропонована принципова схема гравітаційно-каскадної установки для контрольованого завантаження силосів зерном (див. рис. 1). Установка складається із бункера 1, заслінки 2, кріплення 3, металевого корпусу у вигляді паралелепіпеду 4, в середині якого шарнірно встановлені три пересипні полиці 5 і 6, з довжиною  $l$  та кутами нахилу  $\alpha$ ,  $\beta$  та  $\gamma$  відповідно.

Вважаємо, що маса зерна висипається із бункера дослідної установки і має стаціонарний потік. Для зменшення травмування зерна необхідно щоб кінцева швидкість зерна в кінці руху по останній полиці була однаковою з початковою швидкістю потоку на початку першої полиці, але не менша за неї  $V_{поч} \leq V_{кін}$  [3, 4]. Для спрощення подальших розрахунків будемо вважати, що ці швидкості рівні між собою  $V_{поч} = V_{кін} = V_0$  [4]. Висота падіння  $h$  між всіма трьома полицями є однаковою. В момент падіння зернової маси з отвору бункера на початковий край першої ділянки відбувається перехід її потенціальної енергії в кінетичну, зерно набуває швидкість  $V_0 = \sqrt{2gh_0}$ .



**Рис. 1. Принципова схема каскадної установка з трьома полицями**

Продовжуючи рух, зерновий потік збільшує свою швидкість до  $V_{max}$  проходячи шлях  $l$  по першій ділянці, розташованій під кутом  $\alpha$  до горизонту. Врахувавши перехід частини потенціальної енергії в кінетичну, маємо:

$$\frac{mV_0^2}{2} \sin \alpha + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha = \frac{mV_{max}^2}{2}.$$

Після проходження першої полиці зерно падає з відстані  $h$  на другу полицю з кутом нахилу  $\beta$  до горизонту, де рух здійснюється завдяки отриманій до цього максимальній кінетичній енергії на I полиці, додатково набутої кінетичної енергії під час падіння з висоти  $h$  та потенціальної енергії зерна. Даному процесу протидіє робота сили тертя, яка за рахунок меншого кута нахилу  $\beta \leq \alpha$  є вже значно більшою і зумовлює зменшення швидкості з  $V_{max}$

до  $\frac{2V_{\max}}{3}$ . Тобто, в модель закладається зменшення максимальної швидкості руху зерна на третину, що повинно запобігти згруженню зерна. Врахувавши вище зазначене маємо:

$$\left(\frac{mV_{\max}^2}{2}\sin\alpha + mgh\right)\sin\beta + mgl_2\sin\beta - \mu mgl_2\cos\beta = \frac{m\left(\frac{2V_{\max}}{3}\right)^2}{2}.$$

Рух зернового потоку по третій полиці, розміщеній під кутом  $\gamma$  до горизонту, відбувається аналогічно за рахунок попередньо набутої кінетичної та потенціальної енергії, якій протидіє робота сили тертя, яка за рахунок меншого кута нахилу  $\gamma$  ( $\gamma \leq \alpha$ ) спричиняє зменшення швидкості руху зернового потоку з  $V$  до початкової  $V_0$ .

Об'єднавши вище наведені залежності, отримуємо аналітичну модель гравітаційного руху зерна по трьом полицям каскадної установки:

$$\begin{cases} mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2} \\ \frac{mV_0^2}{2}\sin\alpha + mgl_1\sin\alpha - \mu mgl_1\cos\alpha = \frac{mV_{\max}^2}{2} \\ \left(\frac{mV_{\max}^2}{2}\sin\alpha + mgh\right)\sin\beta + mgl_2\sin\beta - \mu mgl_2\cos\beta = \frac{2mV_{\max}^2}{9} \\ \left(\frac{2mV_{\max}^2}{9}\sin\beta + mgh\right)\sin\gamma + mgl_1\sin\gamma - \mu mgl_1\cos\gamma = \frac{mV_0^2}{2} \end{cases} \quad (1)$$

З рівнянь 1–3 системи (1) маємо рівняння що визначає  $\angle\beta$  через заданий  $\angle\alpha$ :

$$((h_0 + l)\sin^2\alpha - \mu l\sin\alpha\cos\alpha + h + l)\sin\beta - \mu l_2\cos\beta = \frac{4}{9}(h_0\sin\alpha + l\sin\alpha - \mu l\cos\alpha). \quad (2)$$

Прирівнявши перше, друге і четверте рівняння системи (1) та спростивши вираз маємо рівняння що визначає  $\angle\gamma$  через кути  $\angle\alpha$  і  $\beta$ :

$$\left(\frac{4}{9}(h_0 + l)\sin\alpha\sin\beta - \frac{4}{9}\mu l\cos\alpha\sin\beta + h + l\right)\sin\gamma - \mu l\cos\gamma = h_0. \quad (3)$$

Розв'яжемо рівняння (2) при заданому куті  $\alpha$  для першої ділянки. Перший коефіцієнт зліва і праву сторону рівняння (2) позначимо через  $a$  і  $b$  відповідно. Отримаємо тригонометричні рівняння виду

$$\begin{aligned} a\sin\beta - \mu l\cos\beta &= b; \\ a &= ((h_0 + l)\sin^2\alpha - \mu l\sin\alpha\cos\alpha + h + l); \\ b &= \frac{4}{9}(h_0\sin\alpha + l\sin\alpha - \mu l\cos\alpha). \end{aligned}$$

Розв'яжемо рівняння за допомогою переходу до половинного кута, отримуємо вираз, що описує залежність між кутами  $\alpha$  і  $\beta$ :

$$\beta = 2\arctg\left(\frac{-a + \sqrt{a^2 + (\mu^2 l_2^2 - b^2)}}{\mu l_2 - b}\right) + 2\pi k. \quad (4)$$

Аналогічно розв'яжемо рівняння (3), ввівши відповідні заміни:

$$\gamma = 2\arctg\left(\frac{-c + \sqrt{c^2 + (\mu^2 l_2^2 - d^2)}}{\mu l_2 - d}\right) + 2\pi k. \quad (5)$$

З (4) і (5) маємо систему рівнянь, яка визначає кути  $\beta$  та  $\gamma$  через заданий кут  $\alpha$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{-a + \sqrt{a^2 + (\mu^2 l^2 - b^2)}}{\mu l - b} \right) + 2\pi k \\ a = (h_0 + l) \sin^2 \alpha - \mu l \sin \alpha \cos \alpha + h + l \\ b = \frac{4}{9} (h_0 \sin \alpha + l \sin \alpha - \mu l \cos \alpha) \\ \gamma = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{-c + \sqrt{c^2 + (\mu^2 l_2^2 - d^2)}}{\mu l_2 - d} \right) + 2\pi k \\ c = \frac{4}{9} (h_0 + l) \sin \alpha \sin \beta - \frac{4}{9} \mu l \cos \alpha \sin \beta + h + l \\ d = h_0 \end{array} \right. \quad (6)$$

Аналітична модель (1) і (6) дає можливість знаходити співвідношення кутів нахилу  $\beta$  та  $\gamma$  відповідно другої і третьої полиці в залежності від кута  $\alpha$  першої пересипної полиці для забезпечення умови однаковості початкової та кінцевої швидкості зернової маси. Модель враховує початкову висоту падіння зерна  $h_0$  на першу полицю, відстань між полицями  $h$ , довжину полиць  $l$ , а також коефіцієнт тертя  $\mu$  між шаром зерна та матеріалом пластин.

**Геометричні параметри каскадної установки та їх обговорення.**

Дослідження характеру зміни параметрів гравітаційно-каскадної установки проводились за наступних умов: висота падіння  $h = 0,2$  м; довжина усіх полиць  $l$ ; початкова висота падіння  $h_0 = 0,3$  м; кути нахилу полиць  $\beta \leq \alpha$ ,  $\gamma \leq \alpha$ . В якості змінних факторів було прийнято кут нахилу  $\alpha$  першої полиці та довжину полиць  $l$ . При цьому кут  $\alpha$  змінювався в проміжку від  $45^\circ$  до  $75^\circ$ , а довжина полиць приймалась в діапазоні  $0,3, \dots, 1,3$  м.

Визначальними параметрами теоретичних досліджень були кут  $\beta$  нахилу другої полиці та кут  $\gamma$  нахилу третьої полиці. При цьому, аналізу піддавались ті результати, де обидва кути були меншими або дорівнювали куту нахилу першої полиці  $\alpha$ . Обрахунок визначальних кутів  $\beta$  та  $\gamma$  відповідно до (6) проводився в кілька етапів, у кожному з яких один із змінних факторів приймав сталі значення, а інший варіювався в прийнятих для нього межах.

На рисунку 2 приведені результати визначення кутів  $\beta$  та  $\gamma$  при зміні довжини полиць  $l$  у варіативному ряду сталих значень кута нахилу  $\alpha$  першої полиці:  $45^\circ, 55^\circ, 65^\circ$  та  $75^\circ$ . На графіках можна відмітити різний характер формування кутів  $\beta$  та  $\gamma$  як по тенденції так і за числовим діапазоном своєї зміни при варіюванні довжини полиць  $l$ . Кут нахилу другої полиці при збільшенні довжини полиць  $l$  для кожного сталого кута  $\alpha$  має лінійний характер зростання. При цьому діапазон зміни кута складає від  $19,5^\circ$  до  $22,2^\circ$  для усіх варіантів кута  $\alpha$ . На відмінну від кута  $\beta$ , кут  $\gamma$  третьої полиці характеризується своєю нелінійною зміною, подібною до гіперболічного виду,

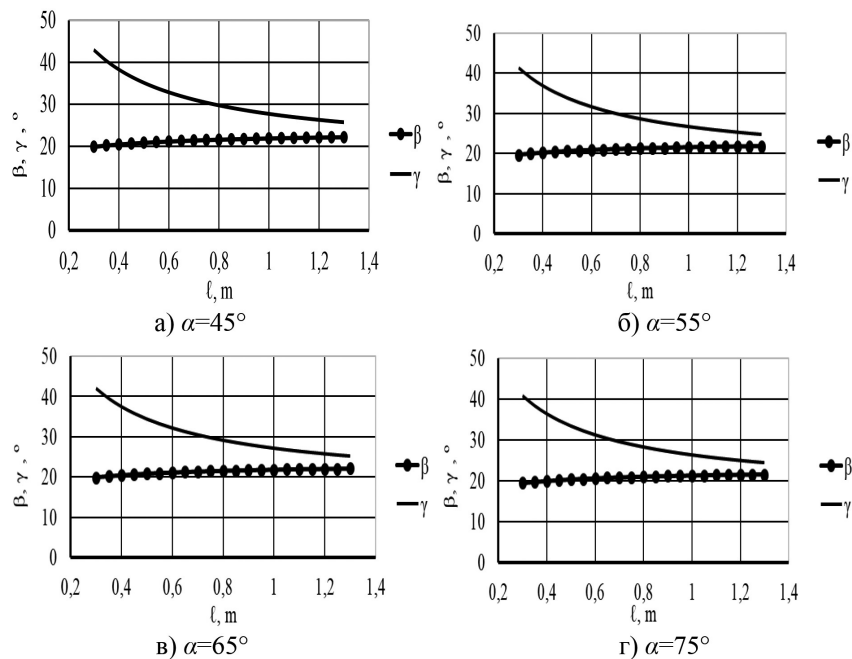


Рис. 2. Залежність кутів  $\beta$  та  $\gamma$  від  $l$  та  $\alpha$

і зменшується зі зростанням довжини  $\ell$ . Так, при  $\alpha = 45^\circ$ : кут  $\gamma$  змінюється в межах  $25,72 \dots 42,96^\circ$ , при  $\alpha = 55^\circ$  кут  $\gamma$  варіюється від  $25,14^\circ$  до  $41,98^\circ$ , при  $\alpha = 65^\circ$  кут  $\gamma$  перебуває в межах від  $24,69^\circ$  до  $41,25^\circ$ , а для кута  $\alpha = 75^\circ$  кут  $\gamma$  формується в діапазоні  $24,55 \dots 40,72^\circ$ .

При співставленні між собою сформованих діапазонів зміни кута  $\gamma$  можна зазначити про їхню ідентичність як по ширині цих діапазонів, так і по їх граничним значенням. Зокрема, різниця між мінімальним та максимальним значенням кута  $\gamma$  для кожного із чотирьох діапазонів становить  $16,37 \dots 17,24^\circ$ , відрізняючись між собою на  $0,18 \dots 0,4^\circ$ . При цьому відмінність по мінімальними значеннями кута  $\gamma$  не перевищує  $1,88^\circ$ , а при порівнянні максимальних значень різниця не є більшою за  $2,24^\circ$ . Отримані результати свідчать, що кут нахилу першої полиці не відіграє суттєвого впливу на формування визначальних кутів на відмінну від довжини полиць. Зі збільшенням довжини полиць кут нахилу третьої ділянки може зменшитися на  $17,24^\circ$ , а другої полиці – збільшитися на  $2,26^\circ$ .

На рис. 3 приведені результати визначення кутів  $\beta$  та  $\gamma$  при зміні кута нахилу  $\alpha$  розгінних ділянок у варіативному ряду сталих значень довжини полиць  $\ell$ : 0,3, 0,6, 0,9 та 1,2 м.

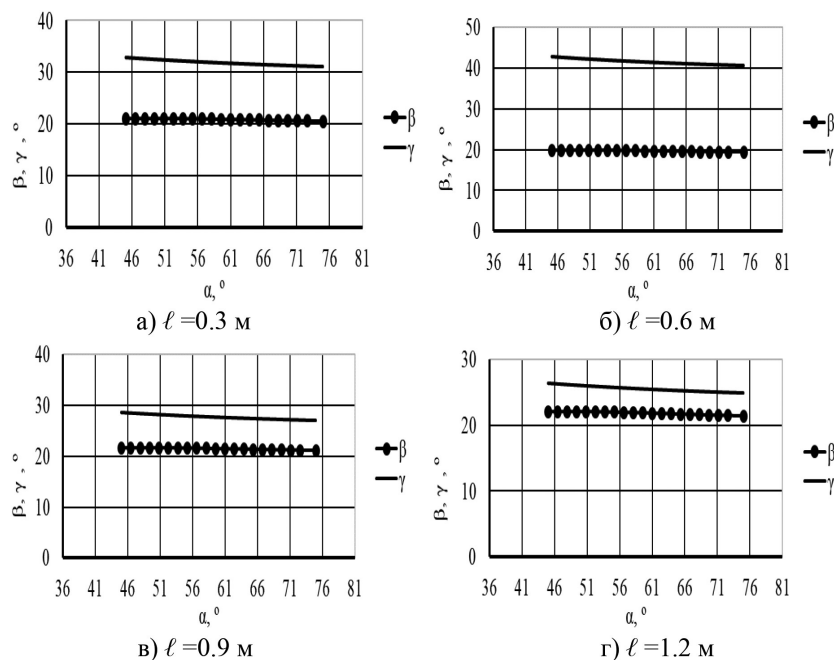


Рис. 3. Залежність кутів  $\beta$  та  $\gamma$  від  $\alpha$  та  $\ell$

Для обох кутів  $\beta$  та  $\gamma$  збільшення кута  $\alpha$  призводить до їх зменшення. При цьому характер їхньої зміни максимально наближений до лінійних залежностей, що найбільш яскраво простежується для кута  $\gamma$ . У свою чергу, залежність кута  $\beta$  від  $\alpha$  при різній довжині  $l$  представляє собою майже полого ділянку прямої, на границі якого зменшення кута  $\beta$  відбувається на незначну величину –  $0,42 \dots 0,59^\circ$ . Абсолютне ж значення кута  $\beta$ , в залежності від факторів впливу, коливається від  $19,89^\circ$  до  $21,48^\circ$ , що є значно меншим від будь-якого прийнятого кута  $\alpha$  та повністю відповідає умові співвідношення між цими кутами. Аналогічно формується і кут  $\gamma$ . Так, при  $l = 0,3$  м в діапазоні зміни  $\alpha$  від  $45^\circ$  до  $75^\circ$ ,  $\gamma$  зменшується від  $42,96$  до  $40,72^\circ$ . Зі збільшенням довжини полиць відбувається розширення меж варіювання кута  $\gamma$ . Для  $l = 0,6$  м кут  $\gamma$  поступово зменшується в більш широкому проміжку  $32,85 \dots 31,15^\circ$  при зростанні кута  $\alpha$  від  $45^\circ$  до  $75^\circ$ . Для  $l = 0,9$  м кут  $\gamma$  зменшується від  $28,64^\circ$  до  $27,13^\circ$ . Для  $l = 1,2$  м кут  $\gamma$  спадає в межах від  $26,29^\circ$  до  $24,89^\circ$ .

Наведенні результати дають змогу стверджувати, що при сталості одного зі змінних факторів, у даному випадку довжини полиць, зміна іншого фактору майже не впливає на формування значень кутів другої та третьої полиці. Так, для кута  $\beta$  максимальна його варіація не перевищує  $0,59^\circ$ , а кут  $\gamma$  змінюється в максимальній своїй величині на  $1,4^\circ$ . В той же час різниця між значеннями кута  $\gamma$  для різних діапазонів може відрізнитися більше ніж на  $10^\circ$ . Тобто довжина полиць має більш суттєвий вплив лише на формування кута орієнтації третьої полиці, а кут нахилу першої полиці має вкрай малий вплив на кути  $\gamma$  та  $\beta$ .

Приймаючи до уваги сформовані та проаналізовані характеристики зміни кутів нахилу полиць гравітаційно-каскадної установки від факторів впливу, можна стверджувати про теоретично досяжну можливість дотримання ключової умови використання установки, а саме рівність швидкості на вході та виході з неї, тобто контрольованого руху зерна.

### Висновки

Представлена аналітична модель контрольованого руху зерна по пересипним полицям завантажувальної гравітаційно-каскадної установки визначає залежність кутів нахилу другої і третьої полиці від кута нахилу першої полиці, враховує початкову висоту падіння зерна, відстань між полицями, їх довжину, а також коефіцієнт тертя.

За допомогою розробленої аналітичної моделі проведений теоретичний аналіз співвідношень між кутами нахилу трьох ділянок каскадної установки в залежності від зміни довжини полиць та кута нахилу першої ділянки. На основі цих досліджень запропоновано принципову схему гравітаційно-каскадної з трьома регульованими полицями для завантаження зерна без травмування у висотні силоси. Це дає можливість подальшого використання аналітичної моделі та каскадної установки для потреб промисловості.

### Список використаної літератури

1. Chen Z., Wassgren C., Ambrose K. A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *Transactions of the ASABE*. 2020. 63(2). 455–475. <https://doi.org/10.13031/trans.13643>
2. Zeng Ch., Wang Y. Compressive behavior of wheat from confined uniaxial compression tests. *International Agrophysics*. 2019. 33(3). С. 347–354 doi: 10.31545/intagr/110809.
3. Антонєць А. В., Флегантов Л. О., Іванов О. М., Арендаренко В. М. Дослідження контрольованого гравітаційного руху зерна у похилому каналі з трьома змінними кутами нахилу. *Вісник Полтавського державного університету*. 2021. № 3. С. 265–273. doi: 10.31210/visnyk.2021.03.33
4. Arendarenko V., Antonets A., Ivanov O., Dudnikov I., Samoilenko T. Building an analytical model of the gravitational grain movement in an open screw channel with variable inclination angles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 3(7 (111)). С. 100–112. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235451>
5. Pylypaka S., Nesvidomin V., Zaharova T., Pavlenko O., Klendiy M. The investigation of particle movement on a helical surface. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. С. 671–681. doi: 10.1007/978-3-030-22365-6\_67
6. Arendarenko, V., Samoilenko, T., Ivanov, O., Ryzhkova, T. Results of experimental research on the distribution of a falling grain from a toro-shaped plate on a flat surface. *Scientific Progress & Innovations*. 2023. 26 (1). С. 96–101. doi: 10.31210/spi2023.26.01.15
7. Мельник В. І., Самоїленко Т. В. Аналіз напрямків удосконалення конструкції пристроїв для завантаження силосів. *Інженерія природокористування*. 2018. 1(9). С. 83–91.

### References

1. Chen Z., Wassgren C., Ambrose K. (2020). A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *Transactions of the ASABE*, 63(2), 455–475. <https://doi.org/10.13031/trans.13643>
2. Zeng Ch., Wang Y. (2019). Compressive behavior of wheat from confined uniaxial compression tests. *International Agrophysics*, 33(3), 347–354 doi: 10.31545/intagr/110809
3. Antonets A. V., Flehantov L. O., Ivanov O. M., Arendarenko V. M. (2021). Doslidzhennya kontrol'ovanoho hravitatsiynoho rukhu zerna u pokhylomu kanali z tr'oma zminnymy kutamy nakhyly. [Investigation of controlled gravitational grain movement in an inclined channel with three variable inclination angles]. *Visnyk PDAA*, 3, 265–273. doi: 10.31210/visnyk.2021.03.33 [in Ukrainian].
4. Arendarenko V., Antonets A., Ivanov O., Dudnikov I., Samoilenko T. (2021). Building an analytical model of the gravitational grain movement in an open screw channel with variable inclination angles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(111)), 100–112. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235451>
5. Pylypaka S., Nesvidomin V., Zaharova T., Pavlenko O., Klendiy M. (2020). The investigation of particle movement on a helical surface. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 671–681. doi: 10.1007/978-3-030-22365-6\_67
6. Arendarenko V., Samoilenko T., Ivanov O., Ryzhkova T. (2023). Results of experimental research on the distribution of a falling grain from a toro-shaped plate on a flat surface. *Scientific Progress & Innovations*, 26(1), 96–101. doi: 10.31210/spi2023.26.01.15
7. Melnyk V. I., Samoilenko, T. V. (2018). Analiz napryamkiv udoskonalennya konstruktsiy prystroyiv dlya zavantazhennya sylosiv. [Analysis of directions for improving the design of silo loading devices]. *Inzheneriya Pryrodokorystuvannya*, 1 (9), 83–91 [in Ukrainian].