

УДК 681.5.015

INTEGRATION OF INDIRECT MEASUREMENTS AND MODELING FOR DETERMINING THE DESCENT VELOCITY OF BULK MATERIALS IN INDUSTRIAL OBJECTS

ІНТЕГРАЦІЯ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ І МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ СХОДУ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ

Tarasevich I.G. / Тарасевич І.Г.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-3249-619X

Selegei A.M. / Селегей А.М.

d.t.s., as.prof. / д.т.н., доц.

ORCID: 0000-0003-3161-5270

Ukrainian State University of Science and Technologies,

Dnipro, Science avenue, 4, 49600

Український державний університет науки і технологій,

Дніпро, пр. Науки, 4, 49600

Анотація. *Визначення швидкості сходу (опускання) сипучих матеріалів у накопичувальних ємностях, бункерах і печах шахтного типу є однією з ключових задач сучасних систем керування матеріальними потоками в металургії, хімічній промисловості, енергетиці та будівельній індустрії. Нерівномірність руху матеріалу, утворення зон застою та каналізації потоку зумовлюють значні похибки оцінювання фактичних запасів сировини, що ускладнює оперативне управління виробничими процесами.*

Особливої актуальності ця задача набуває для печей шахтного типу, де швидкість опускання матеріалу безпосередньо впливає на тепловий режим, перебіг фізико-хімічних процесів і якість кінцевого продукту. Відсутність достовірної інформації про динаміку руху сипучих матеріалів обмежує можливості реалізації замкнених систем автоматизованого керування запасами та витратами.

У сучасних умовах ефективно розв'язання цієї задачі потребує поєднання методів непрямого вимірювання, математичного та чисельного моделювання й алгоритмів обробки даних у реальному часі. Реалізація таких підходів створює передумови для підвищення точності обліку матеріалів, стабілізації технологічних процесів і побудови ефективних автоматичних систем керування матеріальними потоками.

Ключові слова: *сипучі матеріали, швидкість сходу (опускання), накопичувальні ємності, шахтні печі, матеріальні потоки, автоматизовані системи керування, облік запасів, DEM-моделі, радіолокаційні рівнеміри, адаптивні системи*

Abstract. *Determining the descent (discharge) velocity of bulk materials in storage vessels, bunkers, and shaft-type furnaces is one of the key challenges of modern material flow control systems in metallurgy, the chemical industry, energy production, and construction. Non-uniform material movement, the formation of stagnant zones, and flow channeling lead to significant errors in estimating actual material inventories, thereby complicating operational process control.*

This problem is particularly critical for shaft-type furnaces, where the material descent velocity directly affects the thermal regime, the course of physicochemical processes, and the quality of the final product. The lack of reliable information on the dynamics of bulk material motion limits the implementation of closed-loop automated systems for inventory and flow-rate control.

Under modern industrial conditions, effective solution of this problem requires the integration

of indirect measurement techniques, mathematical and numerical modeling, and real-time data processing algorithms. The application of such integrated approaches creates prerequisites for improving material accounting accuracy, stabilizing technological processes, and developing efficient automated material flow control systems.

Key words: bulk materials, descent (discharge) velocity, storage vessels, shaft furnaces, material flows, automated control systems, inventory accounting, DEM models, radar level sensors, adaptive systems

Вступ.

Визначення швидкості сходу (опускання) сипучих матеріалів у накопичувальних ємностях, бункерах і печах шахтного типу є складною науково-технічною задачею, зумовленою неоднорідністю матеріального шару, змінністю фізико-механічних властивостей та наявністю зон застою і каналізації потоку. Традиційні методи контролю, що ґрунтуються на локальних або інтегральних вимірюваннях, не забезпечують достатньої точності оцінювання просторово-часової динаміки руху матеріалу, що обмежує ефективність систем керування матеріальними потоками [1].

Основний текст.

Узагальнений аналіз наукових джерел дозволяє визначити основні підходи до визначення швидкості руху сипучих матеріалів у накопичувальних ємностях, бункерах і печах шахтного типу та оцінити їх придатність для керування матеріальними потоками. До таких підходів належать аналітичні та регресійні моделі, що встановлюють залежності швидкості від параметрів частинок і геометрії ємності [2], чисельне моделювання методом дискретних елементів (DEM), яке відтворює мікродинаміку руху частинок і вплив геометричних та фізико-механічних факторів [3], а також DEM-моделі з валідацією емпіричних законів, зокрема формули Beverloo, що застосовують в обмежених діапазонах параметрів [4]. Окрему групу становлять імітаційні та експериментально-аналітичні моделі, що дозволяють досліджувати вплив конструктивних параметрів бункерів на витрату та рівномірність потоку [5].

Аналіз результатів експериментальних і чисельних досліджень [2–5] показує, що аналітичні та напівемпіричні моделі забезпечують задовільну оцінку середніх швидкостей за усталених режимів із похибкою $\pm 10\text{--}30\%$, яка

зростає за неусталених умов. Метод дискретних елементів характеризується вищою просторово-часовою роздільною здатністю та типовою похибкою $\pm 5\text{--}12\%$, тоді як комбіновані імітаційні моделі з експериментальною валідацією дозволяють знизити її до $\pm 3\text{--}10\%$. Непрямі промислові методи, засновані на вимірюванні рівня або масового балансу, придатні для оперативного моніторингу, проте без корекційних моделей мають обмежену точність ($\pm 10\text{--}25\%$).

Таким чином, у сучасних умовах найбільш перспективним є поєднання чисельного DEM-моделювання з експериментальною валідацією та адаптивною ідентифікацією параметрів моделі за результатами безперервних натурних вимірювань. Такий підхід дозволяє враховувати змінність властивостей матеріалу в процесі експлуатації та забезпечує визначення швидкості сходу сипучих матеріалів з похибкою не вище 10% , що є достатнім для задач автоматизованого керування матеріальними потоками.

Запропонований підхід. Для підвищення точності визначення швидкості опускання сипучих матеріалів у роботі запропоновано комбінований підхід, що ґрунтується на чисельному моделюванні процесу сходу матеріалу методом дискретних елементів у поєднанні з безперервним безконтактним радіолокаційним вимірюванням рівня поверхні матеріалу. Експериментально визначена швидкість зміни рівня поверхні використовується для адаптивної корекції параметрів DEM-моделі, що дозволяє враховувати змінні фізико-механічні властивості матеріалу та підвищити достовірність оцінювання швидкості руху сипучого матеріалу в об'ємі накопичувальної ємності або шахтної печі.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення точності та достовірності визначення швидкості сходу сипучих матеріалів у ємностях, бункерах і печах шахтного типу як інформативного параметра автоматизованого керування матеріальними потоками шляхом поєднання DEM-моделювання з безперервним безконтактним вимірюванням рівня матеріалу та адаптивною корекцією параметрів моделі в замкнених контурах керування.

Для досягнення мети роботи вирішено такі завдання: проаналізовано методи визначення швидкості руху сипучих матеріалів і оцінено їх придатність для автоматизованих систем керування; обґрунтовано доцільність використання швидкості сходу як вимірюваного та керованого параметра в системах автоматизованого керування технологічними процесами підготовки, транспортування та переробки сипучих матеріалів; запропоновано метод непрямого експериментального визначення швидкості сходу на основі безперервного безконтактного радіолокаційного вимірювання рівня матеріалу; розроблено алгоритм адаптивної корекції параметрів DEM-моделі за результатами зіставлення модельних і вимірних значень; синтезовано структурну схему автоматичної системи керування матеріальними потоками з використанням оцінки швидкості сходу для формування керуючих впливів та стабілізації процесу; оцінено перспективи застосування запропонованого підходу для реалізації адаптивного керування запасами і витратами сипучих матеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

В умовах сучасного промислового виробництва контроль подачі сипучих матеріалів є критичним для стабільності технологічних процесів, зокрема в накопичувальних ємностях та печах шахтного і доменного типу. Швидкість сходу матеріалу визначає масопотік у наступні агрегати та безпосередньо впливає на рівномірність нагріву, обробки й розподілу матеріалу в колоні печі. Використання цього параметра в системах автоматизованого керування забезпечує стабільну подачу і дозування, своєчасне виявлення блокувань та адаптивну корекцію процесу. Для шахтних печей середня швидкість переміщення матеріалу в циліндричній частині становить близько 0,004 м/с, що істотно впливає на якість продукції та продуктивність агрегату. У доменних печах швидкість опускання шихти визначає газопроникність шару, інтенсивність тепло-масообміну та однорідність навантаження, а її контроль у реальному часі сприяє підвищенню ефективності та зниженню енергоспоживання [6]. Таким чином, вимірювання і керування швидкістю

сходу сипучого матеріалу є ефективним інструментом автоматизованого керування технологічними процесами.

Для непрямого експериментального визначення швидкості опускання сипучого матеріалу запропоновано метод безперервного безконтактного радіолокаційного вимірювання рівня поверхні. На основі часових рядів зміни рівня, отриманих радарними датчиками, шляхом диференціювання визначається середня швидкість сходу матеріалу. Метод є неінвазивним, стійким до пилу та неоднорідності сипкого середовища, придатним для інтеграції в системи автоматизованого керування і перевершує традиційні контактні та вагові підходи за надійністю й оперативністю [7].

Для відтворення динаміки руху матеріалу в ємностях складної геометрії використано DEM-модель. Запропоновано алгоритм адаптивної корекції її параметрів на основі порівняння модельних і експериментально вимірених значень швидкості сходу. Корекція ключових параметрів частинок (коефіцієнтів тертя, відскоку, густини) забезпечує узгодження моделі з реальними умовами процесу, підвищує точність прогнозування масопотоку та дозволяє використовувати оцінку швидкості як інформаційний сигнал у замкненому контурі автоматичного керування для стабілізації матеріального потоку [8].

На рисунку 1 представлено структурну схему автоматичної системи керування швидкістю руху сипучого матеріалу з адаптивною корекцією параметрів DEM-моделі. Реалізовано непряме адаптивне керування з ідентифікатором: спочатку оцінюються параметри об'єкта, а потім на основі цих оцінок коригуються параметри регулятора [9]. Система має два замкнені контури: основний – автоматичного керування швидкістю опускання матеріалу, та контур адаптації DEM-моделі. Похибка між виміряною та змодельованою швидкістю сходу використовується для корекції DEM, забезпечуючи узгодженість цифрового двійника з реальним процесом у шахтній печі.

Структура системи та перелік блоків:

блок 1 – задавач швидкості опускання сипучих матеріалів, блок 2 –

обчислювач (суматор), блок 3 – регулятор матеріального потоку, блок 4 – виконавчий пристрій (шибер, живильник), блок 5 – об'єкт керування (бункер, шахтна піч), блок 6 – вимірювальна система (радіолокаційний рівнемір), блок 7 – обчислювач швидкості сходу, блок 8 – блок адаптації DEM-моделі, блок 9 – DEM-модель руху сипучого матеріалу, блок 10 – оцінювач стану.

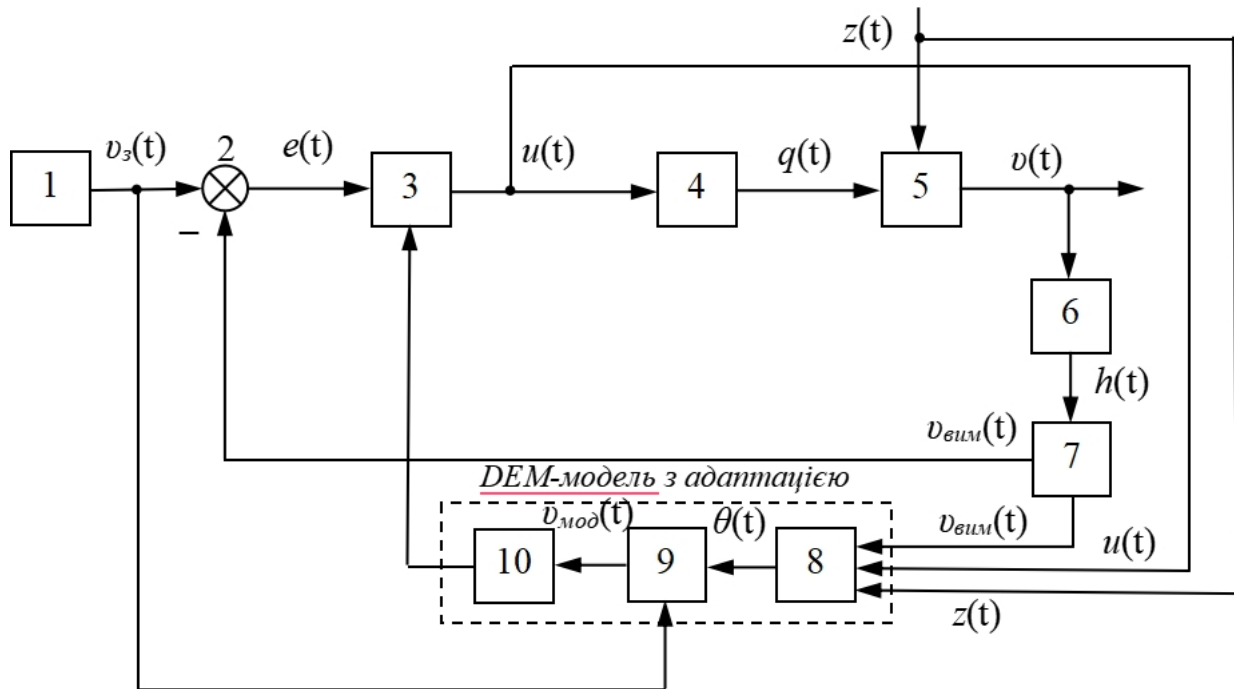


Рисунок 1 – Структурна схема автоматичної системи керування швидкістю опускання сипучих матеріалів з адаптивною корекцією параметрів DEM-моделі
Авторська розробка

Опис основних сигналів: $v_z(t)$ – задана швидкість сходу матеріалів, $u(t)$ – керуючий вплив (положення шибера / витрата), $h(t)$ – рівень матеріалу в накопичувальній ємності, $v_{вим}(t)$ – виміряна швидкість сходу, $v_{мод}(t)$ – швидкість сходу з DEM-моделі, $\theta(t)$ – скориговані параметри DEM-моделі, $e(t)$ – сигнал неузгодженості, $z(t)$ – збурюючі впливи на об'єкт керування.

Запропонована дворівнева структура автоматичної системи керування, в якій чисельна DEM-модель використовується як аналітично-прогностичний модуль, що опосередковано впливає на процес керування шляхом адаптації параметрів регулятора, корекції уставок та формування обмежень для системи керування. Такий підхід забезпечує підвищення точності оцінювання швидкості

сходу сипучих матеріалів, стійкість замкненого контуру керування та можливість прогнозування передаварійних режимів без порушення вимог реального часу.

Результати моделювання та оцінена швидкість сходу далі передаються до системи SCADA або верхнього рівня АСУ ТП, де використовуються для обліку запасів, керування подачею матеріалу, оптимізації матеріальних потоків і формування керуючих впливів на виконавчі механізми (живильники, затвори, дозатори).

Висновки.

В роботі проаналізовано існуючі методи визначення швидкості сходу сипучих матеріалів у накопичувальних ємностях, бункерах і печах шахтного типу. Встановлено, що найвищу точність забезпечують чисельні методи, зокрема DEM-моделювання у поєднанні з експериментальною валідацією. Запропоновано комбінований підхід, який інтегрує DEM-модель із безперервним безконтактним радіолокаційним вимірюванням рівня матеріалу та алгоритмом адаптивної корекції параметрів моделі. Така інтеграція дозволяє підвищити точність оцінки швидкості сходу, забезпечити стабільність замкненого контуру керування та прогнозувати нестабільні режими технологічного процесу. Розроблена дворівнева структура автоматичної системи демонструє доцільність використання швидкості сходу як інформаційного та керованого параметра для ефективного управління матеріальними потоками. Підхід має перспективи впровадження у промислових умовах для підвищення продуктивності обладнання та зниження ризику технологічних порушень.

Література:

1. Гевко І. Б., Пелешек Т. М., Рогатинська Л. Р. Дослідження переміщення сипкого вантажу в робочому просторі бункерних систем. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2009. Вип. 78. С. 322-332.
2. Стаценко В. В., Біла Т. Я., Бурмістенков О. П. Аналіз руху сипкого

матеріалу на виході бункерів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. 2018. № 4 (124). С. 85-95.

3. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я. Дослідження характеру плинущі сипких матеріалів в бункерних пристроях методом дискретних елементів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія : Технічні науки*. 2018. № 6 (267), Т. 1. С. 7-14.

4. Leticia M. V. da Silva, Erlifas Moreira Rocha, Piter Gargarella, Pedro Augusto, Moreira F. P. DEM Simulations of Spheres Flowing Through a Hopper: Validation of Beverloo Law. *Materials Science (cond-mat.mtrl-sci)*. *arXiv:2512.03698*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.03698>

5. Bembenek M., Dmytriv V., Banha V., Horodniak R., Pawlik J. A Mathematical Model for Conical Hopper Mass Efficiency. *Applied Sciences*. 2024. 14(16), 7373. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14167373>

6. Селегей А. М., Іващенко В. П., Чистяков В. Г., Головко В. І. Параметри випуску шихтових матеріалів із бункерів безконусних завантажувальних пристроїв доменної печі. *Науковий вісник НГУ*. 2020. №3. С. 41-46.

DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/041>

7. Solid level detection sensors and measurements: principles and applications. Vega Company Blog. URL: <https://www.vega.com/en-us/company/blog/2019/solid-level-detection-sensors-and-measurements> (дата звернення: 27.12.2025).

8. Hajivand Dastgerdi R., Malinowska A.A. A Simplified Calibration Procedure for DEM Simulations of Granular Material Flow. *Materials*. 2024. 17(19):4833.

DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194833>

9. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования: учеб. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Выща шк. Головное изд-во, 1989. 431 с. ISBN 5-11-000225-8

Статтю відправлено: 28.12.2025 р.

© Тарасевич І.Г.

УДК 004.2

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF FLANGE CONNECTION CALCULATION USING THE FEM AND CFEM METHODS

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ ФЛАНЦЕВОГО З'ЄДНАННЯ МЕТОДОМ МСЕ ТА КМСЕ

Maksymiuk Y.V. / Максим'юк Ю.В.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-5814-6227

*Kyiv National University of Construction and Architecture,**Kyiv, Povitrianykh Syl Avenue, 31, 03037**Київський національний університет будівництва і архітектури,**Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037***Mytsiuk S.V. / Мицюк С.В.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-6481-4036

*Kyiv National University of Construction and Architecture,**Kyiv, Povitrianykh Syl Avenue, 31, 03037**Київський національний університет будівництва і архітектури,**Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037***Mytsiuk D.V. / Мицюк Д.В.***PhD student / аспірант.*

ORCID: 0000-0002-3583-8052

*Kyiv National University of Construction and Architecture,**Kyiv, Povitrianykh Syl Avenue, 31, 03037**Київський національний університет будівництва і архітектури,**Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037*

Анотація. У роботі виконано розрахунок фланцевого болтового з'єднання круглих труб із застосуванням програмних комплексів ЛІРА-САПР та IDEA StatiCa. Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання, отриманих за методом скінченних елементів у просторовій постановці (МСЕ) та компонентним методом скінченних елементів (КМСЕ). Розглянуто особливості роботи з'єднання під дією згинального моменту та проаналізовано відмінності у напружено-деформованому стані та зусиллях у болтах, визначених різними підходами.

Ключові слова: метод скінченних елементів, компонентний метод скінченних елементів, IDEA StatiCa, фланцеве болтове з'єднання, дія згинального моменту, порівняльні розрахунки Ліра Сапр та IDEA StatiCa

Abstract. The work has performed the calculation of flange bolted connection of round pipes using the LIRA-SAPR and IDEA StatiCa software packages. A comparative analysis of the modeling results obtained by the finite element method in spatial formulation (FEM) and the component finite element method (CFEM) has been carried out. The features of the connection under the action of a bending moment have been considered and the differences in the stress-strain state and forces in the bolts determined by different approaches have been analyzed.

Key words: Finite element method, component-based finite element method, IDEA StatiCa, flange bolted connection, action of bending moment, comparative calculations of Lira Sapr and IDEA StatiCa.,