

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-32>

УДК 621.92

**МАРЧЕНКО МАКСИМ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8645-3013>

e-mail: [max.khnu@gmail.com](mailto:max.khnu@gmail.com)

**ХАРЖЕВСЬКИЙ В'ЯЧЕСЛАВ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4816-2781>

e-mail: [kharzhevskiyi@khmnu.edu.ua](mailto:kharzhevskiyi@khmnu.edu.ua)

**ПІДГАЙЧУК СВІТЛАНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9868-6447>

e-mail: [svitlankayar@gmail.com](mailto:svitlankayar@gmail.com)

**ФЕДОРІВ ВІКТОР**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4499-0910>

e-mail: [fedoriv55@ukr.net](mailto:fedoriv55@ukr.net)

## МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСАДЖУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ САД/САЕ

У статті розглянуто застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) з метою моделювання технологічного обладнання харчових виробництв, призначеного для розділення неоднорідних систем типу «рідина–рідина» та «рідина–тверде тіло» з використанням програмного комплексу SOLIDWORKS Flow Simulation. Показано, що використання CFD-методів є ефективним інструментом для оптимізації роботи технологічного обладнання харчових виробництв, який зменшує кількість експериментальних досліджень та сприяє підвищенню енергоефективності обладнання та якості кінцевої продукції. Розроблена методика та результати досліджень використовуються в навчальному процесі для підготовки здобувачів вищої освіти машинобудівних спеціальностей.

**Ключові слова:** технологічне обладнання, моделювання, обчислювальна гідродинаміка, CFD, SOLIDWORKS Flow Simulation

MARCHENKO MAKSYM, KHARZHEVSKYI VIACHESLAV,  
PIDHAICHUK SVITLANA, FEDORIV VIKTOR

Khmelnytskyi National University

## MODELING OF GEOMETRICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF SEDIMENTATION EQUIPMENT USING CAD/CAE

The paper is dedicated to the application of computational fluid dynamics (CFD) methods for modeling and analyzing technological equipment used in food processing industries for the separation of heterogeneous systems of the “liquid–liquid” and “liquid–solid” types. Such separation processes play a key role in ensuring the quality, safety, and stability of food products, as well as in improving the efficiency of technological operations. The objects of the study include cyclones, separators, and settling tanks, which are widely applied in dairy, sugar, and canning industries for purification, clarification, concentration, and phase separation of process streams.

Numerical simulation of two-phase flows was carried out using a CFD environment, which made it possible to perform a detailed analysis of internal hydrodynamic processes that are difficult or impossible to investigate exclusively by experimental methods. The study focused on determining velocity and pressure fields, flow structure, trajectories of dispersed particles or droplets, and the conditions governing particle settling and phase separation. Particular attention was paid to the influence of design parameters, such as geometric characteristics of the equipment, as well as operating conditions, including flow rate and physical properties of the phases, on the efficiency of separation processes.

The obtained simulation results demonstrate that CFD methods provide reliable and informative predictions of the performance of technological equipment at both the design and modernization stages. It is shown that numerical modeling enables the identification of unfavorable flow zones, assessment of separation efficiency, and evaluation of the impact of constructive and regime parameters on process outcomes. The use of CFD as a design and analysis tool allows for the optimization of equipment geometry and operating modes, a significant reduction in the scope of time-consuming and costly experimental studies, improvement of energy efficiency, and enhancement of the quality and stability of final food products. Overall, the results confirm the expediency and prosperity of integrating CFD-based approaches into the development and improvement of separation and sedimentation equipment for food processing industries. The developed technique and research results are used in the academic process for the students of engineering specialties of higher education establishments.

**Keywords:** technological equipment, modeling, computational fluid dynamics, CFD, SOLIDWORKS Flow Simulation

Стаття надійшла до редакції / Received 07.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Марченко Максим, Харжевський В'ячеслав, Підгайчук Світлана, Федорів Віктор

### Постановка проблеми

Процеси розділення неоднорідних систем «рідина–рідина» та «рідина–тверде» тіло є характерними для великої кількості галузей промисловості. У переробних та харчових виробництвах для розділення неоднорідних систем широко використовуються циклони, відстійники та сепаратори. Зокрема, циклони застосовуються для очищення повітря в борошномельному виробництві; аспірації зерна під час його очищення, сушіння та

транспортування; видалення сухих домішок у комбікормовому виробництві; для попереднього очищення повітря перед фільтрацією в сушильних установках.

Геометричні та експлуатаційні характеристики технологічного обладнання, що призначене для реалізації цих процесів, безпосередньо впливають на його енергоспоживання, продуктивність, якість кінцевого продукту та екологічну безпеку виробництва. Таким чином, правильний вибір конструкції апаратів і режимів їх роботи має вирішальне значення для ефективності технологічних процесів.

Водночас задача вибору оптимальних конструктивних параметрів та режимів роботи ускладнюється різноманіттям внутрішніх гідродинамічних процесів, серед яких: формування потоків, їх турбулентність, взаємодія фаз, процеси осадження частинок різного розміру і густини тощо. Традиційні експериментальні методи дослідження таких процесів потребують значних витрат часу та ресурсів і не завжди дозволяють повністю відтворити реальні умови роботи обладнання.

У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування методів обчислювальної гідродинаміки. CFD-методи дозволяють моделювати рух рідин і газів, взаємодію фаз та процеси розділення всередині апаратів без проведення масштабних фізичних експериментів, відкриваючи можливості для оптимізації конструкцій, підбору режимів роботи та підвищення ефективності технологічного обладнання.

#### Аналіз літературних джерел

Традиційні підходи до проектування та удосконалення сепараторів, відстійників та циклонів у харчових виробництвах здебільшого базуються на емпіричних залежностях і трудомістких експериментальних дослідженнях [1], що ускладнює аналіз внутрішньої структури потоків і не завжди дозволяє врахувати особливості багатофазних харчових середовищ. При цьому властивості харчових систем, такі як в'язкість, густина, дисперсність фаз та схильність до утворення емульсій, суттєво впливають на ефективність процесів розділення.

Для типових процесів харчових виробництв характерні різні механізми розділення неоднорідних систем, що викликані різними характером та властивостями дисперсної та дисперсійної фаз (таблиця 1) [5].

Таблиця 1

Характеристика неоднорідних систем, характерних для харчових виробництв

Тип обладнання	Дисперсна система	Діаметр частинок, мкм	Густина частинок, кг/м <sup>3</sup>	Домінуючі сили
Відстійники	Соки з м'якоттю, сиропи	50...500	1050...1300	Гравітаційна, опір середовища
Центрифуги, декантатори	Крохмальні, білкові суспензії; Освітлення соків, вина	20...200	1100...1500	Гравітаційна, відцентрова
Тарілчасті сепаратори	Молоко, вершки, сироватка (жирові кульки)	0,2...15	900...950	Відцентрова, опір середовища
Циклони	Борошняний, цукровий, крохмальний пил (повітря)	1...50	1200...1600	Інерційна, відцентрова
Батарейні циклони	Харчові пилові викиди	0,5...20	1200...1600	Інерційна, відцентрова

Наведені діапазони умовних діаметрів і густин частинок відповідають типовим дисперсним системам харчової промисловості та використовуються як вхідні дані при моделюванні процесів розділення. Узагальнення результатів чисельних досліджень будемо здійснювати на основі безрозмірних критеріїв, що дозволяє порівнювати ефективність осадження для різних типів обладнання та режимів роботи.

Сучасні дослідження в області моделювання технологічного обладнання для розділення неоднорідних систем свідчать про широке застосування методів обчислювальної гідродинаміки для аналізу та оптимізації роботи циклонів, сепараторів і відстійників. CFD-підходи дозволяють аналізувати внутрішні гідродинамічні процеси, включаючи поля швидкостей і тисків, структуру потоку та поведінку дисперсних фаз у апаратах із складною геометрією, що в багатьох випадках важко або неможливо дослідити експериментально [1, 5, 13].

У науковій літературі значна увага приділяється чисельному моделюванню багатофазних потоків із використанням різних розрахункових моделей, які застосовуються для прогнозування ефективності процесів осадження та сепарації частинок різного розміру і густини. Показано, що CFD-моделі дають змогу оцінювати вплив конструктивних параметрів і режимів роботи обладнання на ефективність розділення, а також виявляти зони рециркуляції та гідродинамічні втрати, що негативно впливають на роботу апаратів [3, 6, 9].

Разом із тим, більшість авторів наголошують на необхідності верифікації та валідації чисельних моделей шляхом порівняння з експериментальними даними, оскільки точність результатів значною мірою залежить від вибору моделей турбулентності та фазової взаємодії. Узагальнення сучасних досліджень підтверджує доцільність використання CFD як ефективного інструменту для проектування та модернізації технологічного обладнання харчових виробництв, що дозволяє зменшити обсяг експериментальних досліджень і підвищити енергоефективність процесів розділення неоднорідних систем [1, 10, 11].

Практичний досвід впровадження CAD/CAE-додатків в освітній процес Хмельницького національного університету підтверджує доцільність використання **SOLIDWORKS** як універсального інструменту

комп'ютерного моделювання для розв'язання машинобудівних задач [8, 15-19]. Зокрема, модуль SOLIDWORKS Flow Simulation дозволяє здобувачам освіти, науковцям та інженерам-практикам здійснювати чисельне моделювання внутрішніх та зовнішніх потоків рідин та газів, аналізувати поля швидкостей і тисків, а також оцінювати поведінку дисперсних фаз у апаратах зі складною геометрією. Такий підхід забезпечує не тільки глибоке розуміння гідродинамічних процесів, але й сприяє розвитку компетенцій у проектуванні та оптимізації технологічного обладнання, що особливо актуально для підготовки фахівців у галузі харчового машинобудування.

Не дивлячись на велику кількість досліджень, що стосуються даної тематики, актуальною залишається задача моделювання та оптимізації геометричних та режимних характеристик осаджувального обладнання з метою його раціонального проектування та експлуатації.

**Мета роботи:** встановлення можливостей методів обчислювальної гідродинаміки при моделюванні, оптимізації та проектуванні технологічного обладнання для розділення неоднорідних систем на прикладі застосування програмного комплексу SOLIDWORKS Flow Simulation.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні задачі: 1) проаналізувати фізичні закономірності процесу осадження дисперсних частинок у потоці рідини (на прикладі моделі відстійника) або газу з урахуванням дії гравітаційних та інерційних сил; 2) створити тривимірні розрахункові моделі відстійників та реалізувати її чисельне моделювання з використанням методів обчислювальної гідродинаміки в середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation; 3) виконати моделювання руху та осадження частинок різного діаметра та визначити часткову ефективність осадження для кожної групи частинок; 4) встановити залежність ефективності осадження від значень критеріїв подібності, що характеризують конкретну модель обладнання; 5) визначити інтегральну ефективність осадження з урахуванням гранулометричного складу дисперсної фази; 6) оцінити доцільність застосування CFD-методів як інструменту проектування та оптимізації технологічного обладнання для розділення неоднорідних систем.

#### Виклад основного матеріалу

Методику моделювання наведемо на прикладі гравітаційного відстійника, оскільки така модель враховує майже всі фізичні ефекти, що характерні для процесів гідродинамічного розділення неоднорідних систем за густиною, та які можуть бути враховані розрахунковим алгоритмом SOLIDWORKS Flow Simulation. Методика досліджень інших видів технологічного обладнання (сепараторів і циклонів) може бути проведена за наведеною нижче методикою при врахуванні відцентрових ефектів, характерних для цього виду обладнання.

Для виконання чисельних досліджень була створена спрощена тривимірна модель гравітаційного відстійника (рис. 1) з трьома конфігураціями, яка описує геометрію внутрішнього рідинного об'єму апарата та є достатньою для аналізу гідродинамічних процесів. Сталість геометрії відстійника по його ширині дозволяє використати спрощену двовимірну модель розрахункової сітки, що значно прискорює процес розрахунку.

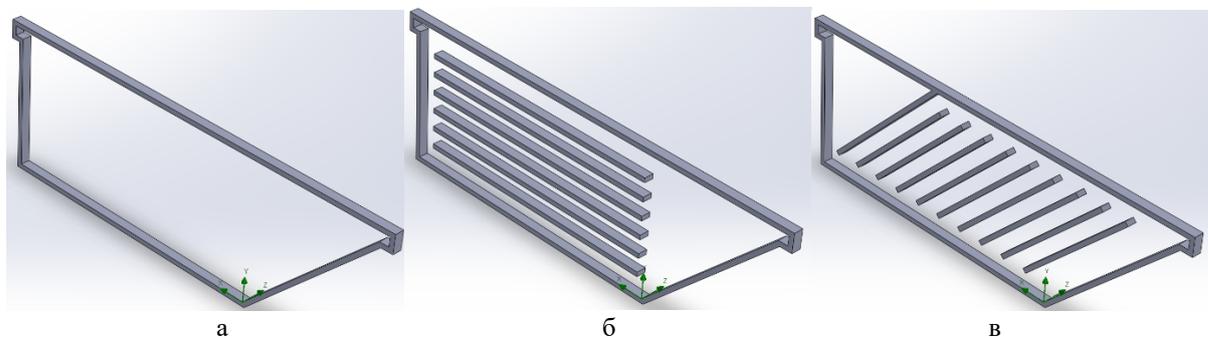


Рис. 1. Геометрична модель проточного гравітаційного відстійника:  
а – без перегородок; б – з горизонтальними перегородками; в – з похилими перегородками

У середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation були сформовані граничні умови на вході та виході потоку. Розрахунок виконувався для модельного середовища з урахуванням можливого ламінарного чи турбулентного режиму потоку, без урахування теплових ефектів і шорсткості стінок. Після автоматичного формування розрахункової області та сітки скінченних об'ємів виконано чисельне моделювання до досягнення усталеного режиму роботи відстійника.

Аналіз результатів базувався на візуалізації полів швидкостей і траєкторій руху фаз, що дозволило дослідити структуру потоку всередині моделі (рис. 2).

Валідацію розрахункових підходів доцільно здійснювати за існуючими емпіричними залежностями [5]. Для узагальнення результатів чисельного моделювання та забезпечення їх масштабної застосовності використано безрозмірні критерії подібності, що характеризують гідродинамічний режим течії та інерційні властивості дисперсної фази.

Число Рейнольдса ( $Re$ ) визначає режим течії у системі та використовується для забезпечення гідродинамічної подібності при порівнянні різних конструктивних варіантів апарата. Для обладнання, що розглянуто в роботі, характерними є ламінарний та перехідний режими руху середовища при  $Re < 10^4$ .

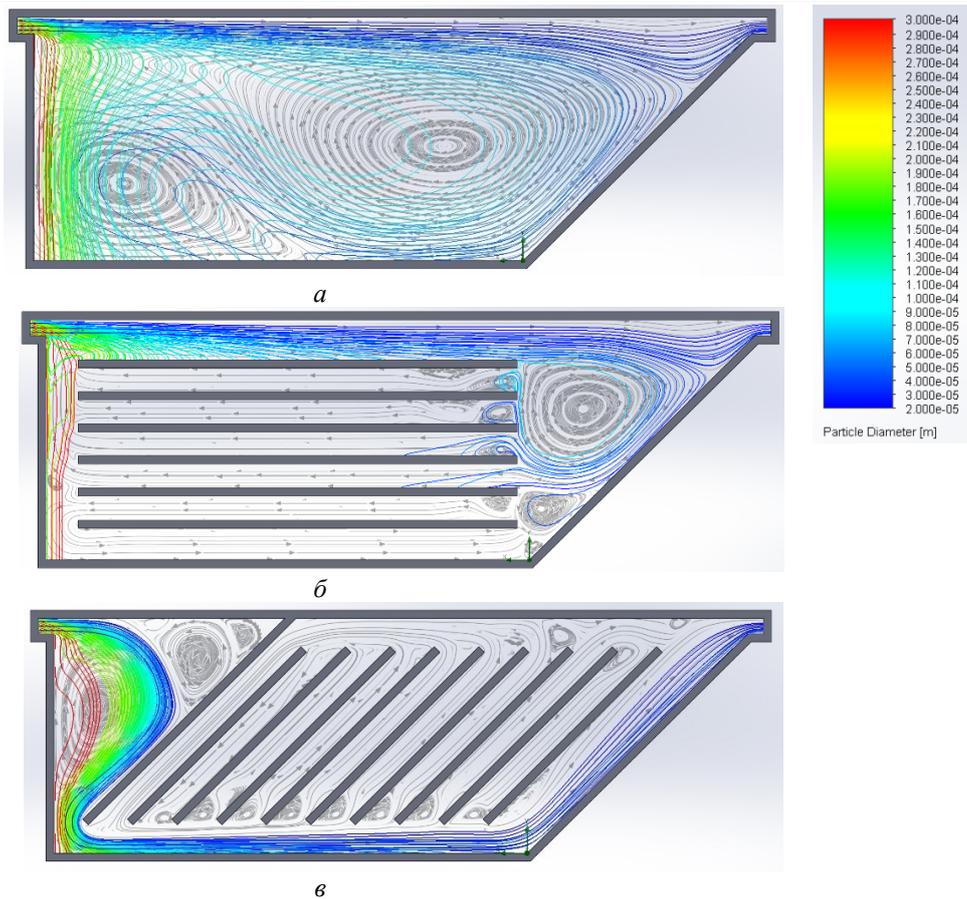


Рис. 2. Лінії току (сірий колір) та траєкторії руху дисперсної фази у відстійнику без перегородок (а) з горизонтальними (б) та похилими перегородками (в)

Ще один критерій подібності – число Стокса – характеризує здатність частинок відхилитися від ліній потоку та осідати під дією інерційних і гравітаційних сил:

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 v}{18\mu L}, \quad (1)$$

де  $\rho_p$  – густина частинки;  $d_p$  – діаметр частинки;  $v$  – швидкість потоку;  $\mu$  – динамічна в'язкість середовища;  $L$  – характерний розмір моделі.

При  $St \ll 1$  – дисперсна фаза рухається разом з потоком;  $St \approx 1$  – має місце граничний режим осадження;  $St \gg 1$  – дисперсна фаза інтенсивно випадає в осад.

Для відцентрового осаджувального обладнання важливим є також критерій Фруда, який відображає співвідношення інерційних і гравітаційних сил та визначає умови осадження частинок у полі тяжіння. Для гравітаційних відстійників:  $Fr \rightarrow 0$  (домінує гравітаційна складова), для відцентрового осаджувального обладнання  $Fr \gg 1$  (домінують відцентрові ефекти).

При рівності критеріїв  $Re$ ,  $St$  та  $Fr$  гідродинамічні умови та процес осадження частинок зберігають якісну і кількісну відповідність незалежно від абсолютних розмірів апарата. Рівність цих критеріїв у модельному та реальному відстійнику дозволяє забезпечити подібність руху фаз, що є необхідною умовою для адекватної перевірки чисельної моделі. Використання даного підходу дає змогу оцінити достовірність прийнятих фізичних моделей, коректність налаштувань розрахункової сітки та граничних умов, а також визначити обмеження застосування моделі для подальших багатоваріантних досліджень геометричних та експлуатаційних факторів апарата.

Чисельне моделювання процесу осадження твердої дисперсної фази у водному середовищі виконано з урахуванням критеріїв гідродинамічної та динамічної подібності. Режим потоку у відстійнику оцінювався за числом Рейнольдса, яке при швидкості потоку на вході 0,01 м/с та характерному лінійному розмірі, що дорівнює  $L = 2$  м, становило  $Re \approx 2 \cdot 10^2$ . Таке значення відповідає ламінарному режиму, характерному для проточних гравітаційних відстійників.

Вплив сили тяжіння на гідродинаміку потоку та процес осадження частинок оцінювався за числом Фруда. Для заданих умов отримано значення  $Fr \approx 5 \cdot 10^{-6}$ , що свідчить про домінування гравітаційних сил над інерційними.

Інерційні властивості частинок аналізувалися за числом Стокса. Для дискретизованого гранулометричного складу (діаметри 50, 100, 200, 300 мкм) число Стокса змінювалося в діапазоні 0,018...0,66, що відповідає переходу від режиму майже повного слідування частинок за потоком до умов їх ефективного

осадження. Таким чином, досліджений діапазон безрозмірних критеріїв відповідає умовам роботи реальних гравітаційних відстійників.

Ефективність уловлювання кожної фракції визначалася за формулою

$$\eta_i = \frac{St_i}{St_i + St_{кр}} \quad (2)$$

де  $St_{кр} = 0,05$  – критичне число Стокса, що відповідає ефективності вловлювання 50 %.

Дрібні частинки ( $d_p = 50$  мкм) показують низьку ефективність осадження ( $\eta \approx 0,353$ ), тоді як більші частинки (100...300 мкм) осідають ефективно ( $\eta \approx 0,825...1,0$ ). З урахуванням масових часток фракцій інтегральна ефективність відстійника для заданого гранулометричного складу становить близько 79 % (табл. 2), що узгоджується з очікуваними результатами для промислових гравітаційних відстійників [2] та відповідними емпіричними залежностями [5].

Зв'язок числа Стокса з ефективністю осадження демонструє поступове зростання  $\eta$  із збільшенням  $St$  та підкреслює важливість врахування дискретизованого гранулометричного складу у чисельному моделюванні.

Таблиця 2

#### Ефективність осаджування за фракціями та інтегральна ефективність

Умовний діаметр частинки, мкм	Критерій Стокса $St$	Масова частка $\omega_i$	Ефективність осаджування $\eta_i$	Питома вага у інтегральній ефективності $\eta_i \times \omega_i$
50	0,018	0,20	0,353	0,071
100	0,074	0,35	0,825	0,289
200	0,29	0,30	0,944	0,283
300	0,66	0,15	1	0,15
<b>Інтегральна ефективність, <math>\eta_{заг}</math></b>	–	–	–	0,792

#### Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено можливості застосування методів обчислювальної гідродинаміки для моделювання, аналізу та оптимізації технологічного обладнання, призначеного для розділення неоднорідних систем. На прикладі відстійника проаналізовано фізичні закономірності руху та осадження дисперсних частинок у потоці рідини з урахуванням дії гравітаційних, інерційних і гідродинамічних сил. Чисельне моделювання, виконане в середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation, дозволило отримати детальну інформацію про поля швидкостей і тисків, структуру потоку, а також траєкторії руху дисперсної фази, що є важливим для поглибленого аналізу механізмів розділення.

У ході дослідження проведено моделювання руху та осадження частинок різного діаметра, на основі чого визначено часткову ефективність осадження для окремих фракцій. Встановлено залежність ефективності розділення від значень критеріїв подібності, що характеризують конструктивні та експлуатаційні параметри конкретних моделей обладнання. Визначено інтегральну ефективність осадження з урахуванням гранулометричного складу дисперсної фази, яка дозволяє адекватно оцінювати реальні показники роботи зазначених апаратів.

Отримані результати підтверджують, що методи обчислювальної гідродинаміки є ефективним інструментом проектування та оптимізації обладнання для розділення неоднорідних систем. Застосування програмного комплексу SOLIDWORKS Flow Simulation забезпечує можливість прогнозування ефективності роботи апаратів на етапах проектування та модернізації, оптимізації конструктивних і режимних параметрів, зменшення обсягу експериментальних досліджень, а також підвищення енергоефективності та стабільності технологічних процесів.

#### Література

1. Brennan J. G. *Food Processing Handbook*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. – 602 p.
2. Berk Z. *Food Process Engineering and Technology*. Burlington, MA; London: Academic Press, 2009. – 622 p.
3. Crowe C.T., Schwarzkopf J.D., Sommerfeld M., Tsuji Y. *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 505 p.
4. Gösta Bylund. *Dairy Processing Handbook*. Tetra Pak Processing Systems AB, Lund, Sweden, 1995. – 442 p.
5. Heldman D.R., Lund D.B., Sabliov C. *Handbook of Food Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2006. – 1038 pp.
6. Hoffmann A.C., Stein L.E. *Gas cyclones and swirl tubes: Principles, design, and operation* (2nd ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 434 p.
7. Lau T.C., Nathan G.J. *The effect of Stokes number on particle velocity and concentration distributions in a well-characterised, turbulent, co-flowing two-phase jet* // *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, №809, P. 72–110.
8. Marchenko M., Kharzhevskiy V., Siainas A. *Optimization of heat exchanger operating modes by means of computational fluid dynamics methods* // *Jaunasis mokslininkas* 2024. Vitautas Magnus University, Lithuania. ISSN 1822-9913. :Issue 21, P. 430-434.

9. Matsson J.E. An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation. New York, NY: Routledge, 2024. – 331 p.
10. Rhodes, M.J. Introduction to Particle Technology (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2008. – 466 p.
11. Roache P.J. Technical Reference of Computational Fluid Dynamics. Albuquerque, New Mexico: Hermosa Publishers, 1998. – 432 p.
12. Sun D. Computational Fluid Dynamics in Food Processing. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. – 776 p.
13. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd ed., Harlow, England: Pearson Education Ltd., 2007. – 517 p.
14. Wolde B., Mortimer L.F., Fairweather M. Stokes Number Effects on Deposition in Particle-Laden Turbulent Pipe Flows // *Chemical Engineering & Technology*, 2023, vol. 46, № 7, pp. 1351–1361.
15. Кушнірчук А. Використання SOLIDWORKS у прототипуванні аеродинамічного хвостового керма / А. Кушнірчук, В. Ткачук, В. Каразей, В. Харжевський, М. Марченко // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2023. – №4, (323). – С. 358-362.
16. Марченко М.В. Моделювання та оптимізація процесу очищення повітря від зернового пилу засобами обчислювальної гідрогазодинаміки / М.В. Марченко, В.О. Харжевський, О.О. Коротич, В.О. Герасименко // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2021. – №3 (297) – С. 100-104.
17. Марченко М.В. Параметрична оптимізація гідродинамічних та теплових параметрів теплообмінного обладнання методами теорії подібності та розмірностей / М.В. Марченко, В.О. Харжевський // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2020. – №5 (289) – С. 172-176.
18. Марченко М.В. Використання системи інженерного аналізу SOLIDWORKS Motion для розв'язання задач кінематики та динаміки технічних систем / М.В. Марченко, В.О. Харжевський, В.П. Ткачук, С.Л. Горященко // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2023. – №5 (325), Т.2. – С. 74-81.
19. Харжевський В., Оптимізаційне проектування зварних металоконструкцій з використанням SOLIDWORKS Simulation на прикладі складських стелажів / В. Харжевський, Р. Божек, С. Підгайчук // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. – 2025. – № 3.1 (351) – С. 534–541.

#### References

1. Brennan J. G. *Food Processing Handbook*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. – 602 p.
2. Berk Z. *Food Process Engineering and Technology*. Burlington, MA; London: Academic Press, 2009. – 622 p.
3. Crowe C.T., Schwarzkopf J.D., Sommerfeld M., Tsuji Y. *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 505 p.
4. Gösta Bylund. *Dairy Processing Handbook*. Tetra Pak Processing Systems AB, Lund, Sweden, 1995. – 442 p.
5. Heldman D.R., Lund D.B., Sabliov C. *Handbook of Food Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2006. – 1038 pp.
6. Hoffmann A.C., Stein L.E. *Gas cyclones and swirl tubes: Principles, design, and operation* (2nd ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 434 p.
7. Lau T.C., Nathan G.J. *The effect of Stokes number on particle velocity and concentration distributions in a well-characterised, turbulent, co-flowing two-phase jet* // *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, №809, P. 72–110.
8. Marchenko M., Kharzhevskiy V., Siainas A. Optimization of heat exchanger operating modes by means of computational fluid dynamics methods // *Jaunasis mokslininkas 2024*. Vitautas Magnus University, Lithuania. ISSN 1822-9913. :Issue 21, P. 430-434.
9. Matsson J.E. An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation. New York, NY: Routledge, 2024. – 331 p.
10. Rhodes, M.J. Introduction to Particle Technology (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2008. – 466 p.
11. Roache P.J. Technical Reference of Computational Fluid Dynamics. Albuquerque, New Mexico: Hermosa Publishers, 1998. – 432 p.
12. Sun D. Computational Fluid Dynamics in Food Processing. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. – 776 p.
13. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd ed., Harlow, England: Pearson Education Ltd., 2007. – 517 p.
14. Wolde B., Mortimer L.F., Fairweather M. Stokes Number Effects on Deposition in Particle-Laden Turbulent Pipe Flows // *Chemical Engineering & Technology*, 2023, vol. 46, № 7, pp. 1351–1361.
15. Kushnirchuk A. Vykorystannia SOLIDWORKS u prototypuvanni aerodynamichnoho khvostovoho kerma / A. Kushnirchuk, V. Tkachuk, V. Karazey, V. Kharzhevskiy, M. Marchenko // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2023. – №4, (323). – S. 358-362.
16. Marchenko M.V. Modeliuvannia ta optymizatsiia protsesu ochyshchennia povitria vid zernovoho pylu zasobamy obchysliuvainoi hidrohazodynamiky / M.V. Marchenko, V.O. Kharzhevskiy, O.O. Korotych, V.O. Herasymenko // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2021. – №3 (297) – S. 100-104.
17. Marchenko M.V. Parametrychna optymizatsiia hidrodinamichnykh ta teplovykh parametriv teploobminnoho obladnannia metodamy teorii podibnosti ta rozmimostei / M.V. Marchenko, V.O. Kharzhevskiy // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2020. – №5 (289) – S. 172-176.
18. Marchenko M.V. Vykorystannia systemy inzhenerneho analizu SOLIDWORKS Motion dlia rozv'iazannia zadach kinematyky ta dynamiky tekhnichnykh system / M.V. Marchenko, V.O. Kharzhevskiy, V.P. Tkachuk, S.L. Horiashchenko // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2023. – №5 (325), Т.2. – S. 74-81.
19. Kharzhevskiy V., Optymizatsiine proiektuvannia zvarnykh metalokonstruktsii z vykorystanniam SOLIDWORKS Simulation na prykladi skladskykh stelazhiv / V. Kharzhevskiy, R. Bozhkek, S. Pidhaichuk // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. – 2025. – № 3.1 (351) – S. 534–541.