

М. В. МАРЧЕНКО, В. О. ХАРЖЕВСЬКИЙ, О. О. КОРОТИЧ

Хмельницький національний університет

В. О. ГЕРАСИМЕНКО

Сумський національний аграрний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД ЗЕРНОВОГО ПИЛУ ЗАСОБАМИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГІДРОГАЗОДИНАМІКИ

Стаття присвячена розробці узагальнених методів розрахунку, моделювання та оптимізації параметрів циклонів, що використовуються для очищення повітря від зернового пилу. Основою розроблених методів є використання засобів обчислювальної гідрогазодинаміки, зокрема програмного комплексу SolidWorks та інтегрованого CFD-додатку SolidWorks Flow Simulation, а також принципів теорії подібності та розмірностей. У якості критерію оптимізації було обрано коефіцієнт ефективності осаджування – відношення маси осаджених часток до загальної маси часток зернового пилу, що поступає в робочий об'єм циклона. За допомогою SolidWorks створена параметризована твердотіла модель циклона з необхідними елементами адаптації до подальшого вивчення газодинамічних процесів. Досліджувалась залежність ефективності осаджування від різноманітних параметрів, що піддаються оптимізації, зокрема від тиску на вхідному та вихідному патрубках циклона; об'ємних витрат повітря, що підлягає очищенню; конструктивних розмірів робочої камери циклона тощо. Використання методів імітаційного моделювання дозволило отримати розширену базу даних параметрів оптимізації та значень цільової функції, що їм відповідають. Узагальнити отриманий масив даних у вигляді безрозмірних критеріїв дозволив аналіз розмірностей величин, що впливають на ефективність осаджування. За допомогою основ теорії подібності встановлено вид функціональної залежності між критеріями подібності. Сталі параметри зазначеної степеневі функції визначені за допомогою двовимірної апроксимації з використанням пакету для математичних розрахунків Mathcad 15. Отримана математична модель дозволяє здійснювати вибір оптимальних режимів роботи (об'ємних витрат повітря, тисків на вході та виході циклона тощо) залежно від конструкції та розмірів циклона, максимізуючи при цьому ефективність осаджування зернового пилу.

Ключові слова: осаджування, циклон, обчислювальна гідрогазодинаміка, оптимізація.

M. V. MARCHENKO, V. O. KHARZHEVSKIY, O. O. KOROTYCH

Khmelnitskyi National University

V. O. HERASYMENKO

Sumy National Agrarian University

MODELING AND OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF AIR PURIFICATION FROM GRAIN DUST BY MEANS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

The article is dedicated to the development of generalized methods of calculation, modeling and optimization of the cyclones' parameters that are used to clean the air from the grain dust. The basis of the developed methods is the usage of computational hydraulic gas dynamics, in particular the SolidWorks software package and the integrated CFD-package SolidWorks Flow Simulation, as well as the principles of theory of similarity and dimensions. The deposition efficiency coefficient was chosen as the optimization criterion that can be calculated as the ratio of the mass of deposited particles to the total mass of grain dust particles entering the working volume of the cyclone. By means of SolidWorks, a parametrized solid model of cyclone with the necessary elements of adaptation for further study of gas-dynamic processes was created. The dependence of the deposition efficiency on various parameters that can be optimized, in particular, on the pressure at the inlet and outlet nozzles of the cyclone was studied; volumetric flow rate of air to be purified; design dimensions of the working chamber of the cyclone etc. The usage of the simulation methods allowed to obtain an extended database of optimization parameters and values of the objective function that correspond to them. The generalization of the obtained data set in the form of dimensionless criteria was enabled by the analysis of the dimensions of the quantities that affect the deposition efficiency. Using the basics of similarity theory, the type of functional dependence between similarity criteria was established. The constant parameters of the mentioned power function are determined using a two-dimensional approximation using a software package for mathematical calculations – Mathcad 15. The obtained mathematical model allows to select the optimal operating modes (volumetric air flow, inlet and outlet pressures of cyclone etc.) depending on the design and the size of the cyclone that allows to maximize the efficiency of grain dust deposition.

Key words: deposition, cyclone, computational fluid dynamics, optimization.

Постановка проблеми

Повітряні викиди промислових підприємств, зокрема таких, що займаються переробкою сільськогосподарської сировини, характеризуються великою різноманітністю дисперсного складу та фізико-хімічних властивостей твердих включень. У зв'язку з цим розроблення ефективних методів очищення відпрацьованого повітря є актуальною техніко-екологічною задачею.

Аналіз останніх досліджень

Методи очистки промислових газових викидів від пилу можна розділити на дві групи: методи уловлювання пилу «сухим» способом і методи уловлювання пилу «мокрим» способом. Апарати знепилювання газів включають: пилоосаджувальні камери, циклони, пористі фільтри, електрофільтри, скрубери тощо [1]. Дослідженнями ефективності осаджування за допомогою циклонів займається значна кількість вітчизняних та зарубіжних вчених, зокрема [2–4, 6, 10].

Як показав аналіз літературних джерел, різноманіття конструктивних особливостей пилоочисного обладнання ускладнює створення узагальненої методики його розрахунку, а отже й процесу вибору оптимального варіанту з усіх можливих конструктивних рішень.

Одним з кроків до створення такої універсальної методики моделювання є використання теорії подібності та розмірностей [9], оскільки вона дозволяє описати одним критеріальним рівнянням цілий клас явищ, які характерні для даної конструкції обладнання. Створення такого рівняння у символічному вигляді є суто теоретичною задачею, яка розв'язується порівняно легко. Набагато складнішим є наступний етап моделювання – знаходження констант сформованого раніше критеріального рівняння, яке ґрунтується на проведенні фізичного експерименту. Ця частина моделювання вимагає значних затрат матеріальних ресурсів і займає багато часу для проведення дослідів. Використання сучасних комп'ютерних технологій дозволяє значно скоротити тривалість зазначеного етапу, а також уникнути фінансових затрат на створення фізичних моделей за рахунок комп'ютерного імітаційного моделювання. Програмне забезпечення, яке реалізує методи розрахункової гідрогазодинаміки, уможливило багатоваріантні дослідження комп'ютерної моделі обладнання за рахунок покрокової зміни вихідних параметрів, а також за рахунок зміни конфігурації моделі, що досліджується. Одним з таких додатків є SolidWorks Flow Simulation, який входить до програмного комплексу SolidWorks. За рахунок орієнтованості на параметричне моделювання системи SolidWorks значно зменшується вплив людського фактору на процес моделювання, що підвищує точність розрахунків, а також мінімізує можливість виникнення помилок.

Виклад основного матеріалу. Метод розмірностей поділяє фізичні величини на основні (первинні), які характеризують фізичне явище безпосередньо (без зв'язку з іншими величинами), і похідні, які виражаються через основні величини відповідно з фізичними законами [9]. В системі СІ початковими є довжина L , маса M , час T , температура t , сила струму I тощо.

Виразення похідної величини через основні називається розмірністю. Формула розмірності похідної величини, наприклад при трьох основних одиницях вимірювання L , M , T має вигляд:

$$\varphi = L^a M^b T^c, \quad (1)$$

де a , b , c – дійсні числа.

Відповідно до рівняння (1) безрозмірні величини мають нульову розмірність, а первинні – розмірність, що дорівнює одиниці.

В основі методу аналізу розмірностей крім наведеного принципу вираження похідної величини через основні розмірності у вигляді їхнього добутку у відповідних степенях лежить аксіома про те, що додаватися та відніматися можуть тільки величини і комплекси величин, які мають однакову розмірність. Задамо перелік величин, які впливають на процес очищення повітря у циклоні заданої конструкції: загальна маса зернового пилу m_0 ; маса пилу, що осіла в циклоні m ; тиск на вхідному патрубку циклона p_0 ; тиск на вихідному патрубку циклона p ; загальні об'ємні витрати повітря в циклоні Q ; характерний розмір циклону D .

Установимо зв'язок між зазначеними вихідними величинами у вигляді критеріального рівняння, виходячи з наступних міркувань.

Якщо яка-небудь фізична величина, наприклад маса m пилу, що осіла в циклоні, визначається як функція інших фізичних величин у вигляді

$$m = f(P, P_0, m_0, Q, D), \quad (2)$$

то ця залежність може бути представлена у найбільш загальній формі у вигляді:

$$m = C P^x P_0^y m_0^z Q^k D^t, \quad (3)$$

де C – константа процесу; x , y , z , k , t – невідомі показники степенів.

Якщо виразити розмірність кожної похідної величини через основні розмірності, то можна знайти величини показників степеня x , y , z і т.д. Таким чином,

$$\begin{aligned} m &= [\text{кг}] = [M]; & m_0 &= [\text{кг}] = [M]; & P &= [\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)] = [MT^{-2}L^{-1}]; \\ P_0 &= [\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)] = [MT^{-2}L^{-1}]; & Q &= [\text{м}^3/\text{с}] = [L^3T^{-1}]; & D &= [\text{м}] = [L]. \end{aligned}$$

Відповідно до рівняння (3) справедлива рівність:

$$[m] = C [P]^x [P_0]^y [m_0]^z [Q]^k [D]^t.$$

Підставляючи вирази розмірностей, отримаємо:

$$[M] = C [ML^{-1}T^{-2}]^x [ML^{-1}T^{-2}]^y [M]^z [L^3T^{-1}]^k [L]^t.$$

Групуючи однорідні члени, знайдемо:

$$M = CM^{x+y+z} L^{-x-y+3k+t} T^{-2x-2y-k}.$$

Якщо в обох частинах рівняння прирівняти показники степеня однакових основних одиниць, то отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} x + y + z = 1; \\ -x - y + 3k + t = 0; \\ -2x - 2y - k = 0. \end{cases}$$

Зазначена система з трьох рівнянь включає п'ять невідомих. Отже, будь-які дві з цих невідомих можна виразити через дві інші, наприклад z , k та t через x , y . Після відповідних математичних перетворень маємо:

$$\begin{cases} k = -2(x + y); \\ t = 7(x + y); \\ z = 1 - x - y. \end{cases}$$

Після підстановки показників степеня у рівність (3) маємо: $m = CP^x P_0^y m_0^{1-x-y} Q^{-2(x+y)} D^{7(x+y)}$. Остаточний вигляд критеріального рівняння після необхідних перетворень:

$$\frac{m}{m_0} = C \left(\frac{PD^7}{m_0 Q^2} \right)^x \cdot \left(\frac{P_0 D^7}{m_0 Q^2} \right)^y. \quad (4)$$

Для спрощення подальших аналітичних викладок представимо зазначене рівняння у вигляді:

$$K_1 = CK_2^x K_3^y. \quad (5)$$

де $K_1 = \frac{m}{m_0}$; $K_2 = \frac{PD^7}{m_0 Q^2}$; $K_3 = \frac{P_0 D^7}{m_0 Q^2}$.

Критеріальне рівняння (5) описує процес очищення повітря за допомогою циклону. У це рівняння входять, два критерії-комплекс K_2 та K_3 і один критерій-симплекс K_1 . Слід також зазначити, що за фізичним змістом критерій $K_1 = m / m_0$ є відношенням відділеної в циклоні маси пилу до загальної його кількості. Величина K_1 виражає ефективність вловлювання зернового пилу, а тому може бути використана в ролі критерію оптимізації конструктивних параметрів циклона.

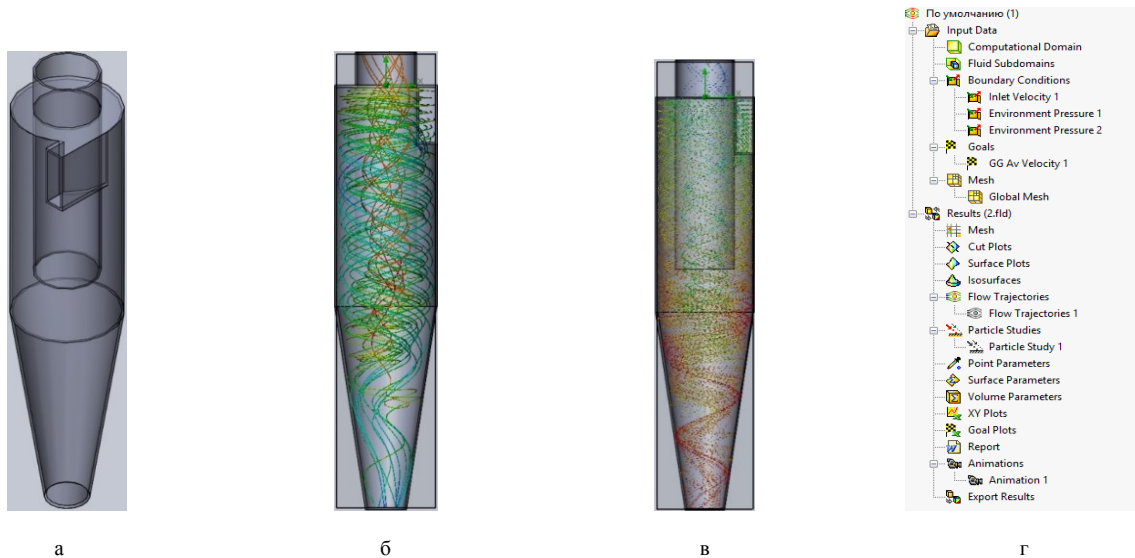


Рис. 1. Моделювання роботи циклону в додатку SolidWorks Flow Simulation:
 а) твердотіла модель циклону; б) траєкторія руху повітря в циклоні;
 в) траєкторія руху пилових частинок в циклоні; г) дерево аналізу SolidWorks Flow Simulation

Для того, щоб остаточно встановити вид критеріального рівняння, необхідно експериментально визначити значення постійних C , x і y . З цієї метою за допомогою SolidWorks Flow Simulation була створена імітаційна модель [5], візуальна інтерпретація якої показана на рис. 1. У процесі моделювання визначались розмірні величини, що входять до складу у всіх критеріїв подібності.

Під час проведення досліджень змінні параметри задавались у використовуваних на практиці діапазонах з певним кроком. Результати окремих ітерацій моделювання заносились до бази даних, в якій окремій сукупності вихідних параметрів моделювання відповідають визначені значення критеріїв подібності K_1 , K_2 та K_3 . Цією операцією завершується підготовчий етап обробки досліджень. Фрагмент бази даних з результатами моделювання наведено в таблиці 1.

Фрагмент бази даних з результатами моделювання

№	D , м	Q , м ³ /с	P_0 , Па	P , Па	m_0 , кг	m , кг	K_1	K_2	K_3
1	0,5	0,05	101325	96258,75	0,0025	0,0017	0,680	120,323	126,656
5	0,5	0,15	101325	101325	0,0075	0,0057	0,760	4,691	4,691
9	0,5	0,25	101325	106391,3	0,0125	0,0104	0,832	1,064	1,013
12	0,6	0,25	101325	96258,75	0,0125	0,0091	0,728	3,449	3,631
14	0,6	0,15	101325	101325	0,0075	0,0055	0,733	16,809	16,809
16	0,6	0,05	101325	106391,3	0,0025	0,0018	0,720	476,524	453,832
21	0,7	0,25	101325	96258,75	0,0125	0,0088	0,704	10,147	10,681
22	0,7	0,05	101325	101325	0,0025	0,0016	0,640	1335,128	1335,128
26	0,7	0,15	101325	106391,3	0,0075	0,0056	0,747	51,922	49,449
28	0,8	0,05	101325	96258,75	0,0025	0,0015	0,600	3229,908	3399,903
32	0,8	0,15	101325	101325	0,0075	0,0052	0,693	125,922	125,922
36	0,8	0,25	101325	106391,3	0,0125	0,0096	0,768	28,559	27,199
39	0,9	0,25	101325	96258,75	0,0125	0,0084	0,672	58,932	62,033
40	0,9	0,05	101325	101325	0,0025	0,0016	0,640	7754,149	7754,149
44	0,9	0,15	101325	106391,3	0,0075	0,0054	0,720	301,550	287,191
47	1	0,15	101325	96258,75	0,0075	0,0047	0,627	570,422	600,444
51	1	0,25	101325	101325	0,0125	0,0087	0,696	129,696	129,696
52	1	0,05	101325	106391,3	0,0025	0,0016	0,640	17022,608	16212,000

Для узагальнення табличних даних у вигляді степеневі залежності зазвичай використовується логарифмічна система координат. Апроксимацією показників степенів x і y досягаємо такого розташування дослідних точок на графіку, щоб через них можна було провести пряму лінію з найменшим середньоквадратичним відхиленням. Рівняння прямої дасть шукану залежність між критеріями.

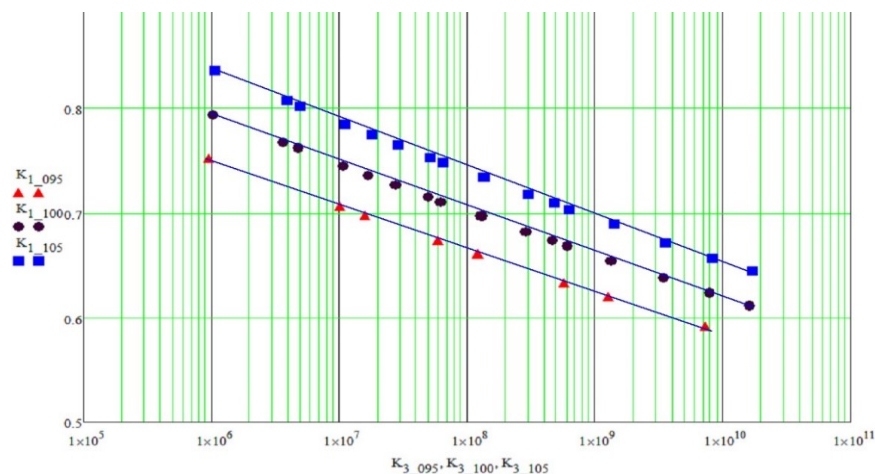


Рис. 2. Апроксимація експериментальних даних в системі Mathcad 15

При кількості критеріїв $\pi = 3$ в логарифмічній системі координат $\lg K_2 - \lg K_1$ отримаємо сімейство кривих, що відповідають різним постійним значенням третього критерію K_3 , який грає роль параметра (рис. 2). Для суміщення сімейства в одну криву координати перетворюємо так, щоб стало можливо застосовувати прийом для випадку $\pi = 2$. Узагальнення проводиться одночасно в двох координатних системах, оскільки невідомі відразу два показника ступеня x і y , які визначаються шляхом підбору. Задаючись значенням x , добиваємось розташування точок вздовж прямої в координатах $\lg K_1/K_2^x - \lg K_3$ і знаходимо значення $y = \operatorname{tg} \beta_1$, де β_1 – кут нахилу апроксимаційної прямої.

При прийнятому значенні y змінюємо величину $x = \operatorname{tg} \beta_2$ в координатах $\lg K_1/K_3^y - \lg K_2$. Операцію підбору x та y проводимо до тих пір, поки на обох графіках не буде досягнуто розташування точок вздовж прямих з найменшим середньоквадратичним відхиленням в обидві сторони від апроксимаційних прямих. Зазначену процедуру апроксимації було реалізовано за допомогою системи автоматизації математичних розрахунків Mathcad 15 [7]. Після цього остаточно знайдемо значення сталого параметра критеріального рівняння C :

$$C = \frac{K_1}{K_2^m K_3^n}$$

Таким чином визначено всі невідомі параметри та отримано остаточний вигляд критеріального рівняння (4). Це, в свою чергу, дозволяє проводити процес оптимізації методами, запропонованими в [8], зокрема обираючи за критерій оптимізації ефективність пиловловлювання.

Висновки

Використання методів обчислювальної гідрогазодинаміки, а також програмного забезпечення SolidWorks Flow Simulation, що їх реалізує, дозволило в короткі строки провести моделювання роботи циклона зазначеної конструкції. У результаті моделювання отримана розширена база даних параметрів та критеріїв подібності, яка використана для знаходження невідомих констант процесу осаджування в циклоні. Отримана математична модель, що представлена у вигляді критеріального рівняння, дозволяє здійснювати вибір оптимальних режимів роботи (об'ємних витрат повітря, тисків на вході та виході циклона тощо) залежно від конструкції та розмірів циклона, максимізуючи при цьому ефективність осаджування зернового пилю.

Література

- Hoffmann A.C. Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design, and Operation / A.C. Hoffmann, L.E. Stein – Berlin: Springer, 2008. – 334 p.
- Maystruk V. V., Gavryliv R. I., Maystruk I. M., Features of determination of geometrical sizes of cyclones with spiral sending vehicle and their influence are on hydraulic resistance // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів, 2014. № 786. – С. 49–52.
- Naumkin A. The characteristic and separation effects in a cylindrical cyclone dust collector. International Youth Scientific Conference on Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment, 2017; Tomsk; Vol. 110. Pp. 126-127.
- Vatin N. I., Sagittarius K. I. Air purification using cyclone type apparatuses. Young Scientist. 2017. Is. 13. P. 165-168.
- Алямовский А.А. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 800 с.
- Майструк В.В. Оцінка енергозатрат при роботі прямиотечійного циклону за допомогою програмного пакету Flow Simulation / В.В. Майструк, Р.І. Гаврилів, А.С. Попіль, А.М. Басистий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків. – 2012. – Вып. 6/8(60). – С. 28-30.
- Макаров Е. Инженерные расчеты в Mathcad 15: учебный курс / Е. Макаров – СПб., 2011. – 400 с.
- 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. – С. 172-176.
- Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Седов Л. И. – М.: Наука, 1987. – 423 с.
- Харченко С.А. Ефективність очищення запиленого повітряного потоку циклонами на зернопереробних підприємствах / С.А. Харченко, С.А. Гаск // Науковий журнал «Інженерія природокористування». – Харків, 2018, № 1(9), – С. 79-82.

References

- Hoffmann A.C. Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design, and Operation / A.C. Hoffmann, L.E. Stein – Berlin: Springer, 2008. – 334 p.
- Maystruk V. V., Gavryliv R. I., Maystruk I. M., Features of determination of geometrical sizes of cyclones with spiral sending vehicle and their influence are on hydraulic resistance // Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnika” Optymizatsiia vyrobnychkykh protsesiv i tekhnichnyi kontrol u mashynobuduvanni ta prylyadobuduvanni. – Lviv, 2014. № 786. – S. 49–52.
- Naumkin A. The characteristic and separation effects in a cylindrical cyclone dust collector. International Youth Scientific Conference on Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment, 2017; Tomsk; Vol. 110. Pp. 126-127.
- Vatin N. I., Sagittarius K. I. Air purification using cyclone type apparatuses. Young Scientist. 2017. Is. 13. P. 165-168.
- Alyamovskij A.A. Kompyuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike / A.A. Alyamovskij, A.A. Sobachkin, E.V. Odincov. – SPb. : BHV-Peterburg, 2005. 800 s.
- Mastruk V.V. Otsinka enerhozatrnat pry roboti priamotechiihnoho tsyklonu za dopomohoiu prohrannoho paketu Flow Simulation / V.V. Mastruk, R.I. Havryliv, A.S. Popil, A.M. Basisty // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohiy. – Kharkiv. – 2012. – Vyp. 6/8(60). – S. 28-30.
- Makarov E. Inzhenernye raschety v Mathcad 15: uchebnyj kurs / E. Makarov – SPb.: Piter, 2011. – 400 s.
- Marchenko M. V. Parametrychna optymizatsiia hidrodynamichnykh ta teplovykh parametriv teploobminnoho obladnannia metodamy teorii podobnosti ta rozmirnostei / M. V. Marchenko, V. O. Kharzhevskiy // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2020. – № 5. – S. 172-176.
- Sedov L. I. Metody podobiya i razmernosti v mehanike / Sedov L. I. – M.: Nauka, 1987. – 423 s.
- Kharchenko S.A. Efektyvnist ochyshchennia zapylenoho povitrianoho potoku tsyklonamy na zernopererobnykh pidpriemstvakh / S.A. Kharchenko, Ye.A. Haiek // Naukovyi zhurnal «Inzheneriia pryrodokorystuvannia». – Kharkiv, 2018, № 1(9), – S. 79-82.

М. В. МАРЧЕНКО	ORCID ID: 0000-0002-8645-3013	max.khnu@gmail.com
В. О. ХАРЖЕВСЬКИЙ	ORCID ID: 0000-0003-4816-2781	vk.solidworks@gmail.com
О. О. КОРОТИЧ	ORCID ID: 0000-0002-7733-3095	olkorotych2017@gmail.com
В. О. ГЕРАСИМЕНКО	ORCID ID: 0000-0001-5875-8517	vladzaoch@ukr.net

Рецензія/Peer review : 20.05.2021 р.

Надрукована/Printed :30.06.2021 р.