УДК 621.929.7:519.63

[1]**В. Т. Дмитрів,** [2]**О. Я. Саган,** [3]**Р. В. Городняк**
[1]Національний університет «Львівська політехніка», ORCID: 0000-0001-9361-6418,
e-mail: vasyl.t.dmytriv@lpnu.ua
[2]Національний університет «Львівська політехніка», ORCID: 0009-0004-5116-8679,
e-mail: oleh.y.sahan@lpnu.ua
[3]Національний університет «Львівська політехніка», ORCID: 0009-0003-0952-0846,
e-mail: roman.v.horodniak@lpnu.ua

https://doi.org/10.23939/istcipa2023.57.

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ РОЗМІРНОСТЕЙ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ДОЗАТОРІВ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Мета. Розроблення методів теорії подібності й розмірності, критеріальних величин, як проміжної складової між теорією і експериментом, що забезпечує функціональний зв'язок між цілими комплексами величин, які характеризують процес на рівні фізичної моделі і спрощують проведення планованого експерименту. **Методика.** Для побудови математичних моделей у процесі дослідження безперервного дискового дозатора можуть бути використані процеси, що мають єдину природу взаємодії фізичних явищ. Тобто моделюю для процесів, що протікають при дозуванні, можуть бути лише ті фізичні процеси, які відносяться до механіки дисперсного тіла. У такому випадку основні процеси, що протікають в моделі і натурі, матимуть однакові рівняння, що описують подібні процеси. Зокрема, для моделювання процесу дозування можуть бути використані геометричні, кінематичні та динамічні подібності. **Результати.** Застосування методів теорії подібності й розмірності, критеріальних величин, як проміжної складової між теорією і експериментом, забезпечує функціональний зв'язок між цілими комплексами величин, які характеризують процес на рівні фізичної моделі. **Наукова новизна.** Використання теорії розмірності у процесі факторного планованого експерименту дає змогу скоротити кількість факторів, спрощує математичну інтерпретацію характеру критерію відгуку і забезпечує графічне представлення у вигляді 3-D моделі. Вихід на фундаментальні числа подібності підтверджує достовірність моделі і розширює число факторів, які безпосередньо через числа подібності характеризують фізику процесу. **Практична цінність.** Методика перетворення факторного простору методами теорії подібності розмірностей й уможливлення формування критеріальних величин, як проміжної складової між теорією і експериментом, що забезпечує функціональний зв'язок між цілими комплексами величин, які характеризують процес на рівні фізичної моделі і спрощують проведення планованого експерименту для процесів і систем, що характеризуються значною кількістю факторів.

***Ключові слова*:** критеріальне рівняння, метод розмірностей, моделювання, фактор, планований експеримент, дозатор, сипкий матеріал.

Вступ

Експериментально-аналітичне моделювання процесів на рівні фізичних явищ та закономірностей, зокрема, технічного, технологічного та на рівні оперативного управління процесів, вимагає враховувати значну кількість факторів, які характеризують взаємозв’язки між параметрами технологічного процесу й фізико-механічними характеристиками компонентів, що беруть участь у технологічному процесі. Для узагальнення та визначення характеристик виконання технологічного процесу доцільно отримати структуризовані залежності, які описують у першому наближенні фізику процесу й уможливлять визначення критичних меж факторів.

Аналізуючи різні дослідження (як і теоретичні, так і експериментальні), можна зробити висновок, що в теорії планування експерименту найважливішу роль відіграє вибір параметрів процесу. Повинні бути вибрані всі параметри, які мають вплив на технологічний процес, але водночас їх кількість повинна бути мінімальною.

Тому перетворення факторного простору методами теорії подібності розмірностей спрощує дослідження й зменшує кількість дослідів, особливо для складних технологічних процесів, таких як дозування й змішування компонентів сипких матеріалів.

Аналіз літературних джерел

Сьогодні багато технологічних процесів і технічних систем оцінюють великою кількістю параметрів, які є взаємно узгодженими і впливають на показники керування або вимірювання, що характеризують оптимальність системи чи процесу [1]. Моделювання у традиційній формі статистичної моделі відходить до більш масштабованих методів, які враховують велику кількість параметрів, значну кількість даних вибірки та значний інтервал варіювання. Є методи експериментальних досліджень, які зменшують як кількість параметрів, так і кількість даних вибірки. Застосовують аналіз основних параметрів та його варіанти [2, 3], методи кластеризації [4], варіаційний вибір шляхом перевірки незалежності факторів [5, 6] та найменшої кутової регресії [7]. Розроблено інші методи для великих типів даних, це послідовні оновлення для потокових даних [8] або коректування матриць [9]. Ці методи спрямовані на спрощення опрацювання даних, зведення характеристик процесів до лінійних залежностей, але не спрощують кількість факторів для багатофакторних процесів, де кожен параметр є впливовим на критерій оптимізації.

Більш доцільно для великої кількості змінних факторів у процесі проведення експерименту застосовувати сумісне використання методик аналізу розмірностей і сучасного статистичного моделювання експериментів [10, 11]. Використано дворівневий дробовий факторний план для відсіювання параметрів, які не роблять значного внеску в пояснення залежного безрозмірного параметра. Для решти статистично значущих безрозмірних параметрів використовували різні методології поверхні відгуку для отримання функціональної залежності між залежним безрозмірним коефіцієнтом та безрозмірними параметрами.

Метод розмірностей досить широко використовують для аналізу різних процесів, використовують Buckingham Pi-теорему (Buckingham Pi theorem) [12]. Метод розмірностей функцій на прикладі значної кількості параметрів, які згруповані за функціональними характеристиками, демонструє можливість реалізації моделі за виміряними даними в режимі реального часу [13]. Ці дослідження не формують критеріальних безрозмірних залежностей, в яких поєднання факторів унеможливлювали вплив одного фактору на інший. Запропоновані поєднання факторів мають вплив між собою і не можуть бути незалежними, що ставить під сумнів результати експерименту.

Відповідно наведені принципи згрупування факторів не відповідають принципу безрозмірності критеріїв подібності π_1, π_2, …, π_i, як запропоновано в [14 17].

Мета

Метою нашого дослідження є розроблення методів теорії подібності й розмірності, критеріальних величин, як проміжної складової між теорією і експериментом, що забезпечує функціональний зв'язок між цілими комплексами величин, які характеризують процес на рівні фізичної моделі і спрощують проведення планованого експерименту для процесів і систем, що характеризуються значною кількістю факторів.

Методика проведення дослідження Аналізуючи теоретичні і експериментальні дослідження, можна зробити висновок, що в теорії планування експерименту найбільш важливим є вибір параметрів процесу. Прийняті параметри повинні відображати всі основні фактори технологічного процесу, і їх число повинно бути мінімальним для планованого експерименту. Зменшення кількості факторів зменшує кількість дослідів і підвищує достовірність критерію відгуку.

Розмірність факторного простору залежить від числа факторів, тому для спрощення задачі скористаємося методами теорії розмірності, а саме π-теоремою. Суть теореми полягає в тому, що всю сукупність факторів можна згрупувати в безрозмірні критерії подібності $\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_i$ [14–17].

Застосування методів теорії подібності й розмірності, критеріальних величин, як проміжної складової між теорією і експериментом, забезпечує функціональний зв'язок між цілими комплексами величин, які характеризують процес на рівні фізичної моделі.

Застосування запропонованої методики полягає в тому, що вся сукупність факторів згрупована в безрозмірні критерії подібності. Для знаходження цих величин вибираємо основні одиниці вимірювання і через них – розмірність всіх інших величин. Наприклад, кількість факторів є $\boldsymbol{n}$ величин, а $\boldsymbol{r}$ – число величин, що мають незалежні розмірності, отримаємо $\boldsymbol{n - r}$ критеріїв подібності. Вибрані критерії знаходяться у визначеній залежності.

Наприклад, для моделювання гідропневмодинамічних процесів [18, 19]. Критерій Галілея, числа Ейлера і Рейнольдса – аналог імпульсу кінетичної енергії, питомий показник еквіваленту енергозатрат – еквівалентного фактору прибутковості або продуктивності, масштабний фактор і інші. Аналогічно для моделювання, наприклад, змішування багатокомпонентної суміші, обґрунтовано аналог імпульсу кінетичної енергії частинки сипкого матеріалу як відношення $p \cdot g \ \ (\mu \cdot \omega)$, де g – пришвидшення вільного падіння [м/с^2], μ – динамічна в'язкість потоку сипкого компонента [кг/(м·с)], ω —кутова частота обертання [с$^{-1}$], p – тиск в камері змішування компонентів [кг/м^2].

Всі виділені параметри повинні мати фізичний зміст і бути керованими в ході експерименту, відповідати вимогам сумісності і незалежності. Правильність вибору даних параметрів підтверджується визначником, що складається з розмірностей цих параметрів, який не повинен дорівнювати нулю.

Результати дослідження та їх обговорення

Для безперервного дозування сипких матеріалів з одночасним наданням їхнім частинкам матеріалу кінетичної енергії використаємо конусний диск, який, обертаючись, створює відцентрову силу, що регулюється частотою обертання диска, а також створення надлишкового тиску в каналах виходу матеріалу. На основі аналізу конструкційних особливостей відцентрових дозаторів, враховуючи власні дослідження, ми дійшли висновку, що за конструкційно і технологічними особливостями для забезпечення технологічного процесу дозування сипких компонентів у потоці запишемо у загальному вигляді залежності продуктивності від визначальних параметрів

$$Q_{\text{зм}} = f(\omega, g, R_\rho, R_D, \alpha, m_{\text{к}}, \rho \ \ , \mu \ \ , p), \tag{1}$$

де ω – кутова частота обертання дозуючого диска, с$^{-1}$; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; R_ρ – радіус кривизни вихідного каналу, м; R_D – радіус диска, м; α – кут нахилу твірної диска, град; $m_к$ – кількість каналів на диску, шт.; ρ – насипна густина сипкого матеріалу, кг/м^3; μ – динамічна в'язкість потоку сипкого матеріалу, кг/(м·с); p – надлишковий тиск в каналах виходу матеріалу, кг/м^2.

Всі виділені параметри мають фізичний зміст, є керованими в ході планового експерименту і відповідають вимогам сумісності й незалежності.

Теорія розмірності є перехідним етапом між теорією і експериментом, що спрощує і полегшує проведення експерименту, завдяки тому, що вказується раціональна форма обробки дослідних даних і є функціональний зв'язок між цілими комплексами величин [20].

Розмірність факторного простору залежить від числа факторів, тому для спрощення задачі скористаємося методами теорії розмірності (π-теоремою). Суть цієї теореми полягає в тому, що вся сукупність факторів може бути згрупована в безрозмірні критерії подібності Π_1, Π_2, і т.д. Для знаходження цих величин необхідно вибрати основні одиниці вимірювання і через них виразити розмірність всіх інших величин. У цьому випадку n = 9 величин отримаємо $n - r$ = 6 критеріїв подібності. Вибрані критерії знаходяться в визначеній залежності.

Як основні одиниці були прийняті одиниці розмірності довжина, маса, час. Розмірності шуканих і визначальних параметрів робочого процесу наведені в таблиці.

Розмірність параметрів безперервного відцентрового дозатора
Dimensionality of parameters of a continuous centrifugal dispenser

Параметри	ω	g	R_ρ	R_D	A	$m_л$	ρ	μ	Q	P
M	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
L	0	1	1	1	0	0	-3	-1	0	-2
T	-1	-2	0	0	0	0	-	-1	1	0

З таблиці вибираємо основні одиниці вимірювання для цього технологічного процесу. Як основні параметри ми взяли ω, ρ_{10}, p. Правильність вибору цих параметрів дозволяє підтвердити визначник, що складається з розмірності цих параметрів, який не повинен дорівнювати нулю. Розв'язавши такий визначник, отримаємо:

$$\Delta = \begin{array}{c} \\ M \\ L \\ T \end{array} \begin{vmatrix} \omega & \rho & p \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -3 & -2 \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -1 \neq 0 .$$

З врахуванням вибору основних одиниць рівняння (1) можна записати у такому вигляді:

$$Q = \Phi(1; g/(\omega^{\beta g}\rho^{\gamma g}p^{\lambda g}); R_\rho/(\omega^{\beta h}\rho^{\gamma h}p^{\lambda h}); R_D/(\omega^{\beta d}\rho^{\gamma d}p^{\lambda d}); 1; \mu/(\omega^{\beta\mu}\rho^{\gamma\mu}p^{\lambda\mu}); 1) . \quad (3)$$

Значення коефіцієнтів βg, $\gamma h, \ldots \lambda\mu$ визначають з умови, що кожен комплекс є безрозмірною величиною. Значення βg, γg, μg визначаємо так:

$$g/(\omega^{\beta g}\rho^{\gamma g}p^{\lambda g}) = L^1 \cdot T^{-2} / \left[\left| T^{-1} \right|^{\beta g} \left| M^1 \cdot L^{-3} \right|^{\gamma g} \left| M^1 \cdot L^{-2} \right|^{\lambda g} \right] = ;$$

$$= L^1 \cdot T^{-2} / (T^{-\beta g} \cdot M^{\gamma g + \lambda g} \cdot L^{-3\gamma g - 2\lambda g}) = T^{-2+\beta g} \cdot M^{-\gamma g - \lambda g} \cdot L^{1+3\gamma g + 2\lambda g} = 1$$

$-2 + \beta g = 0$, звідки $\beta g = 2$;

$-\gamma g - \lambda g = 0$, звідки $\gamma g = -1$;

$1 + 3\gamma g + 2\lambda g = 0$, звідки $\lambda g = 1$.

Відповідно, цей критерій подібності визначимо відношенням:

$$\Pi_g = \frac{\omega^2 p}{g\rho} . \quad (4)$$

Аналогічно розраховуємо інші критерії:

$$\Pi_{R_\rho} = \frac{p}{\rho \cdot R_\rho}; \; \Pi_D = \frac{p}{\rho \cdot R_D}; \; \Pi_\mu = \frac{p^2\omega}{\rho \cdot \mu} . \quad (5)$$

Враховуючи одержані критерії (4) і (5), рівняння (1) можна записати у такому вигляді:

$$Q = \Phi(\Pi_g, \Pi_{R\rho}, \Pi_D, \Pi_\mu, \alpha, m_к) . \quad (6)$$

Добуток критеріїв (3) і (4) або ділення їх дають нові критерії. Користуючись цим правилом, одержимо:

$$\Pi_{R\rho} : \Pi_D = \frac{R_D}{R_\rho}, \; \Pi_\mu : \Pi_g = \frac{p \cdot g}{\mu \cdot \omega} .$$

Після перетворень одержимо нове критеріальне рівняння:

$$Q = \Phi\left(\frac{p \cdot g}{\mu \cdot \omega}; \frac{R_D}{R_\rho}; \alpha; m_k \right), \quad (7)$$

де $\frac{p \cdot g}{\mu \cdot \omega}$ – безрозмірний фактор подачі компонента на змішування; R_D / R_ρ – масштабний фактор; α, m_k – безрозмірні фактори.

Враховуючи, що кількість каналів на диску незмінна, фактор m_k при проведені експерименту не враховуємо.

Динамічна в’язкість потоку при зміні надлишкового тиску від 0 до 6 кПа залишається постійною.

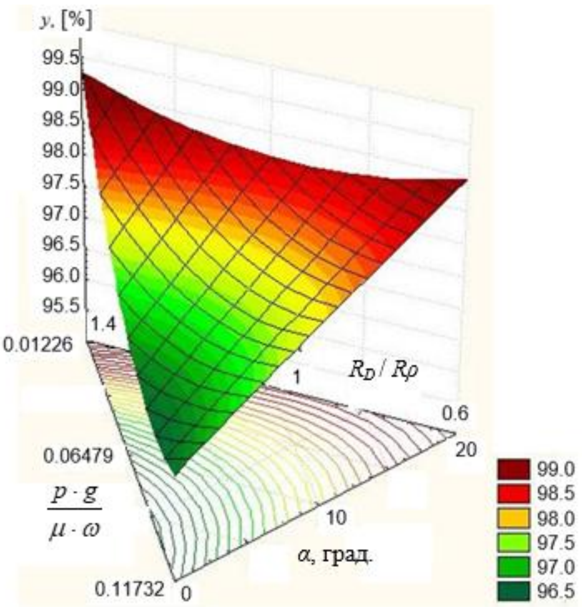
Отже, одержані критерії подібності за своїм фізичним змістом є: $\dfrac{p \cdot g}{\mu \cdot \omega}$ – аналог імпульсу кінетичної енергії частинки сипкого матеріалу, що вводиться; R_D / R_ρ – масштабний фактор; α – кут твірної диска, безрозмірний фактор.

Розглянемо результати планованого експерименту дослідження однорідності змішування дозатора-змішувача, проведеного, використовуючи фактори у вигляді аналога імпульсу кінетичної енергії (x_1) - $p \cdot g/(\mu \cdot \omega)$, кута твірної дозуючого диска α (x_2), масштабний фактора (x_3) - R_D/R_ρ. Критерієм відгуку є однорідність змішування дозатора-змішувача.

Рівняння регресії, яке характеризує залежність однорідності змішування дозатора-змішувача від аналогу імпульсу кінетичної енергії, кута твірної дозуючого диска і масштабного коефіцієнта в натуральних значеннях, має такий вигляд:

$$y = 0{,}0883921 \cdot \frac{p \cdot g}{\mu \cdot \omega} + 0{,}088567 \cdot \alpha - 0{,}0990177 \cdot \frac{R_D}{R_\rho}. \qquad (9)$$

Графічне подання рівняння регресії подано чотиривимірною площиною (див. рисунок).



Залежність однорідності у змішування дозатора-змішувача від аналога імпульсу кінетичної енергії $p \cdot g/(\mu \cdot \omega)$, *масштабного коефіцієнта* R_D/R_ρ *і кута твірної дозуючого диска α*

Dependence of the homogeneity y of mixing of the dispenser-mixer on the analogue of the kinetic energy pulse $p \cdot g/(\mu \cdot \omega)$, *the scale factor* R_D/R_ρ *and the angle of the generator of the dosing disk α*

Розрахункове значення критерію Кохрена G_p = 0.094968 менше від табличного G_T = 0.1377, дослід відтворюватиметься.

Розрахункове значення критерія Фішера становить $F_{роз}$ = 1.5882 є менше від табличного значення F_T = 1.6, що підтверджує адекватність моделі.

Висновки

Використання теорії розмірності при факторному планованому експерименті дає змогу скоротити кількість факторів, що спрощує математичну інтерпретацію характеру критерію відгуку і забезпечує графічне подання у вигляді 3-D моделі. Вихід на фундаментальні числа подібності підтверджує достовірність моделі і розширює число факторів, які безпосередньо через числа подібності характеризують фізичну суть процесів і уможливлюють оптимальне управління задачами за заданими критеріями.

Застосування методів теорії подібності й розмірності, критеріальних величин, як проміжної складової між теорією і експериментом, забезпечує функціональний зв'язок між цілими комплексами величин, які характеризують процес на рівні фізичної моделі.

Список літератури

1. Dmytriv V.T., Dmytriv I.V., Horodetskyy I.M. et all. Adaptive cyber-physical system of the milk production process. INMATEH - Agricultural Engineering. – 2020. – Vol. 61(2). – P. 199–208, DOI: 10.35633/inmateh-61-22
2. Kettaneha N., Berglund A., Wold S. PCA and PLS with very large data sets. Computational Statistics & Data Analysis. – 2005. – Vol. 48(1). – P. 69–85. https://doi.org/10.1016/j.csda.2003.11.027 ;
3. Elgamal T., Hefeeda M. Analysis of PCA algorithms in distributed environments. Preprint. Available at : arXiv:1503.05214v2. – 2015.
4. Bouveyron C., Brunet-Saumard C., Model-based clustering of high-dimensional data: A review. Computational Statistics & Data Analysis. – 2014. – Vol. 71. – P. 52–78. https://doi.org/10.1016/ j.csda.2012.12.008
5. Fan J., Lv J. Sure independence screening for ultrahigh dimensional feature space. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology). – 2008. – Vol. 70(5). – P. 849–911. https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2008.00674.x
6. Fan J., Feng Y., Song R. Nonparametric independence screening in sparse ultra-high dimensional additive models. Journal of the American Statistical Association. – 2011. Vol. 106(494). – P. 544 - 557. DOI: 10.1198/jasa.2011.tm09779
7. Efron B., Hastie T., Johnstone I., Tibshirani R. Least angle regression. The Annals of Statistics. – 2004. - Vol. 32 (2). - P. 407 – 499. https://doi.org/10.1214/009053604000000067
8. Schifano E. D., Wu J., Wang C., Yan J., Chen M.-H. Online updating of statistical inference in the big data setting. Technometrics. – 2016. - Vol. 58(3). - P. 393–403. DOI: 10.1080/00401706.2016.1142900
9. Liberty E. Simple and deterministic matrix sketching. In Proceedings of the 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, (August 2013). – 2013. – P. 581–588. ACM, New York. https://doi.org/10.1145/2487575.2487623
10. Islam M.F., Lye L.M. Combined use of dimensional analysis and modern experimental design methodologies in hydrodynamics experiments. Ocean Engineering. – 2009. – Vol. 36(3-4). – P. 237-247. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2008.11.004
11. Woods D. C., Overstall A. M., Adamou M., Waite T. W. Bayesian design of experiments for generalized linear models and dimensional analysis with industrial and scientific application. Quality Engineering. – 2017. – Vol. 29(1). - P. 91-103. https://doi.org/10.1080/08982112.2016.1246045
12. Hu P., Chang C.-kan. Research on optimize application of Buckingham Pi theorem to wind tunnel test and its aerodynamic simulation verification. Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1507(8). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1507/8/082047
13. Wang Y., Willis S., Tsoutsouras V., Stanley-Marbell Ph. Deriving Equations from Sensor Data Using Dimensional Function Synthesis. ACM Transactions on Embedded Computing Systems. – 2019. – Vol. 18(5s), No. 84. - P. 1–22. https://doi.org/10.1145/3358218
14. Sonin A.A. The Physical Basis of Dimensional Analysis. 2nd Edition, Department of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge. – 2001. http://goo.gl/2BaQM6
15. Shen W., Lin D. K. J. Statistical theories for dimensional analysis. Statistica Sinica. – 2019. – Vol. *29*(2). – P. 527–550. https://www.jstor.org/stable/26705477
16. Albrecht M. C., Albrecht T. A., Nachtsheim C. J., Cook R. D. Experimental Design for Engineering Dimensional Analysis. Technometrics. – 2013. – Vol. 55(3). – P. 257–270. http://www.jstor.org/stable/24587346
17. Jónsson D. Dimensional Analysis: A Centenary Update. – 2014. *arXiv:* 1411.2798
18. Dmytriv V., Dmytriv I., Dmytriv T. Recearch in thermoanemometric measuring device of pulse flow of two-phase medium. 17th International Scientific Conference: Engineering for Rural Development. – 2018. – Vol. 17. – P. 894-904. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.

19. Dmytriv V., Dmytriv I., Horodetskyy I., Dmytriv T. Analytical dynamic model of coefficient of friction of air pipeline under pressure. Diagnostyka. – 2019. – Vol. 20(4). – P. 89–94. DOI: 10.29354/diag/114334

20. Tsoutsouras V., Willis S., Stanley-Marbell Ph. Deriving equations from sensor data using dimensional function synthesis. Communications of the ACM. – 2021. – Vol. 64(7). – P. 91–99. https://doi.org/10.1145/3465216

Vasyl Dmytriv, Oleh Sahan, Roman Gorodnyak
Lviv Polytechnic National University

APPLICATION OF THE THEORY OF DIMENSIONS IN RESEARCH OF FLOOR MATERIALS DISPENSERS IN MULTIFACTOR EXPERIMENT

Aim. The development of methods of the theory of similarity and dimensionality, criterion values, as an intermediate component between theory and experiment, which ensures a functional connection between entire sets of values that characterize the process at the level of a physical model and simplify the planned experiment. **Method.** Processes that have a single nature of the interaction of physical phenomena can be used to build mathematical models in the study of a continuous disk dispenser. That is, only those physical processes related to the mechanics of a dispersed body can serve as models for the processes occurring during dosing. In this case, the main processes occurring in the model and nature will have the same equations describing similar processes. Thus, geometric, kinematic and dynamic similarities can be used to model the dosing process. **Results.** The application of methods of the theory of similarity and dimensionality, criterion values, as an intermediate component between theory and experiment, ensures a functional connection between entire sets of values that characterize the process at the level of a physical model. **Scientific novelty.** The use of dimensionality theory in a factorial planned experiment allows to reduce the number of factors, simplifies the mathematical interpretation of the nature of the response criterion and provides a graphical representation in the form of a 3-D model. Access to the fundamental similarity numbers confirms the reliability of the model and expands the number of factors that characterize the physics of the process directly through the similarity numbers. **Practical value.** The method of transforming the factor space by the methods of the theory of dimensional similarity and enabling the formation of criterion values, as an intermediate component between theory and experiment, which provides a functional connection between entire sets of values that characterize the process at the level of a physical model and simplifies the conduct of a planned experiment for processes and systems, which are characterized by a significant number of factors.

***Keywords*:** criterion equation, dimensional method, modeling, factor, planned experiment, dispenser, loose material.

References

1. Dmytriv V.T., Dmytriv I.V., Horodetskyy I.M. et all. Adaptive cyber-physical system of the milk production process. INMATEH - Agricultural Engineering. – 2020. – Vol. 61(2). – P. 199–208, DOI: 10.35633/inmateh-61-22

2. Kettaneha N., Berglund A., Wold S. PCA and PLS with very large data sets. Computational Statistics & Data Analysis. – 2005. – Vol. 48(1). – P. 69–85. https://doi.org/10.1016/j.csda.2003.11.027 ;

3. Elgamal T., Hefeeda M. Analysis of PCA algorithms in distributed environments. Preprint. Available at : arXiv:1503.05214v2. – 2015.

4. Bouveyron C., Brunet-Saumard C., Model-based clustering of high-dimensional data: A review. Computational Statistics & Data Analysis. – 2014. – Vol. 71. – P. 52–78. https://doi.org/10.1016/j.csda.2012.12.008

5. Fan J., Lv J. Sure independence screening for ultrahigh dimensional feature space. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology). – 2008. – Vol. 70(5). — P. 849–911. https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2008.00674.x

6. Fan J., Feng Y., Song R. Nonparametric independence screening in sparse ultra-high dimensional additive models. Journal of the American Statistical Association. – 2011. – Vol. 106(494). – P. 544–557. DOI: 10.1198/jasa.2011.tm09779

7. Efron B., Hastie T., Johnstone I., Tibshirani R. Least angle regression. The Annals of Statistics. – 2004. – Vol. 32 (2). – P. 407 – 499. https://doi.org/10.1214/009053604000000067

8. Schifano E. D., Wu J., Wang C., Yan J., Chen M.-H. Online updating of statistical inference in the big data setting. Technometrics. – 2016. – Vol. 58(3). – P. 393–403. DOI: 10.1080/00401706.2016.1142900

9. Liberty E. Simple and deterministic matrix sketching. In Proceedings of the 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, *(*August 2013). – 2013. – P. 581–588. ACM, New York. https://doi.org/10.1145/2487575.2487623

10. Islam M.F., Lye L.M. Combined use of dimensional analysis and modern experimental design methodologies in hydrodynamics experiments. Ocean Engineering. – 2009. —Vol. 36(3-4). – P. 237-247. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2008.11.004

11. Woods D. C., Overstall A. M., Adamou M., Waite T. W. Bayesian design of experiments for generalized linear models and dimensional analysis with industrial and scientific application. Quality Engineering. – 2017. – Vol. 29(1). – P. 91-103. https://doi.org/10.1080/08982112.2016.1246045

12. Hu P., Chang C.-kan. Research on optimize application of Buckingham Pi theorem to wind tunnel test and its aerodynamic simulation verification. Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1507(8). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1507/8/082047

13. Wang Y., Willis S., Tsoutsouras V., Stanley-Marbell Ph. Deriving Equations from Sensor Data Using Dimensional Function Synthesis. ACM Transactions on Embedded Computing Systems. – 2019. – Vol. 18(5s), No. 84. - P. 1–22. https://doi.org/10.1145/3358218

14. Sonin A.A. The Physical Basis of Dimensional Analysis. 2nd Edition, Department of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge. – 2001. http://goo.gl/2BaQM6

15. Shen W., Lin D. K. J. Statistical theories for dimensional analysis. Statistica Sinica. – 2019. – Vol. *29*(2). – P. 527–550. https://www.jstor.org/stable/26705477

16. Albrecht M. C., Albrecht T. A., Nachtsheim C. J., Cook R. D. Experimental Design for Engineering Dimensional Analysis. Technometrics. – 2013. – Vol. 55(3). – P. 257–270. http://www.jstor.org/stable/24587346

17. Jónsson D. Dimensional Analysis: A Centenary Update. – 2014. *arXiv:* 1411.2798

18. Dmytriv V., Dmytriv I., Dmytriv T. Recearch in thermoanemometric measuring device of pulse flow of two-phase medium. 17th International Scientific Conference: Engineering for Rural Development. – 2018. - Vol. 17. - P. 894-904. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.

19. Dmytriv V., Dmytriv I., Horodetskyy I., Dmytriv T. Analytical dynamic model of coefficient of friction of air pipeline under pressure. Diagnostyka. – 2019. – Vol. 20(4). – P. 89–94. DOI: 10.29354/diag/114334

20. Tsoutsouras V., Willis S., Stanley-Marbell Ph. Deriving equations from sensor data using dimensional function synthesis. Communications of the ACM. – 2021. – Vol. 64(7). – P. 91–99. https://doi.org/10.1145/3465216