

БЕЗБАХ ІГОР

Одеський національний технологічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-2353-1811>
e-mail: igorbezbakh1003@gmail.com

ВСЕВОЛОДОВ ОЛЕКСАНДР

Одеський національний технологічний університет
<https://orcid.org/0009-0008-9717-3018>
e-mail: avsevolodov725@gmail.com

ЯРОВИЙ ІГОР

Одеський національний технологічний університет
<https://orcid.org/0000-0003-2278-5075>
e-mail: goryarov@gmail.com

БЕЗБАХ СЕРГІЙ

Одеський національний технологічний університет
<https://orcid.org/0009-0003-3948-8410>
e-mail: sbezbakh@gmail.com

ПЕТРОВСЬКИЙ ВЯЧЕСЛАВ

Одеський національний технологічний університет
<https://orcid.org/0009-0008-8683-9857>
e-mail: via982@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФАСУВАННЯ ГУСТИХ ПРОДУКТІВ МЕТОДОМ АНАЛІЗУ РОЗМІРНОСТЕЙ І КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Метою дослідження є отримання залежності, що описує відношення сил тиску на одиничний об'єм рідини і інерційними силами до сил в'язкості. В результаті отримана залежність описує відношення між силами тиску на одиничний обсяг рідини (або газу) та інерційними силами до сил в'язкості. За отриманою залежністю та використовуючи комп'ютерне моделювання і варіюючи діаметри входу і виходу для продукту і змінюючи швидкість переміщення поршня можна визначити тиск ΔP , який безпосередньо впливає на потужність, що витрачається.

Ключові слова: тиск, в'язкість, щільність, потужність, швидкість, π – теорема, число подібності, дозатор, поршень, золотник.

BEZBAKH IGOR, VSEVOLODOV OLEXANDER, YAROVYI IGOR, BEZBAKH SERGIY,
PETROVSSKYI VIACHESLAV
Odesa National Technological University

RESEARCH OF THE PROCESS OF PACKAGING DENSE PRODUCTS BY THE METHOD OF DIMENSIONAL ANALYSIS AND COMPUTER SIMULATION

The filler in question A9-KNE belongs to semi-automatic, piston, linear type, single-position fillers for viscous products with dosing by volume. The main purpose of dosing devices is to provide the required amount of material with sufficient accuracy. According to the structure of the working cycle, the dosage is portioned (discrete), and according to the principle of action, it is volumetric. Discrete dosing is characterized by periodic repetition of dose release cycles. With the volumetric method of dosing, the doser measures the portion using a measuring chamber of a certain volume.

The A9-KNE semi-automatic machine is designed for volume dosing and packaging of food products with a viscosity of 0.4 to 8 Pa s in glass and tin cans. A dose of the product is formed during the stroke of the piston. The piston moves with the help of a drive, which is a fist with a built-in crank, from the crank through a lever mechanism and a pair of bevel wheels, the rotational movement is transmitted to the dispenser spool. When the piston moves in the other direction, the product is squeezed into the can. The purpose of the study is to obtain a dependence that describes the ratio of pressure forces per unit volume of liquid and inertial forces to viscous forces. To solve this problem, it is suggested to use the dimensional analysis method.

The main premise used in the dimensional analysis method when finding the number and type of similarity numbers is the axiom that only quantities of the same dimension can be added and subtracted, as well as the fact that some dimensions are expressed through others in the form of their multiplication in the corresponding degrees. On this basis, it is established that if any physical quantity is a function of other physical quantities, then this dependence can be represented as a product of these dimensions in some powers.

The resulting relationship describes the relationship between pressure forces per unit volume of liquid (or gas) and inertia forces to viscosity forces. Then, in the Gambit program, the working area is built according to the dimensions. The entrance and exit of the product, the walls of the working chamber are designated. Then a map of the working area is built in the form of a grid and exported to the Fluent program. In this program, product parameters (viscosity and density) and boundary conditions (piston movement speed) are set, parameters of the working area are initialized and the necessary calculations are performed. Then, using the TableCurve 3D program based on tabular data, we build a surface that is described by the dependence proposed by the calculation program. In this dependence, there are coefficients for variables. These coefficients are sought in our equation in similarity numbers. According to the obtained dependence, by varying the diameters of the inlet and outlet for the product and changing the speed of the piston movement, it is possible to determine the pressure ΔP , which directly affects the power consumed.

Key words: pressure, viscosity, density, power, speed, π -theorem, similarity number, dispenser, piston, spool.

Встановлення зв'язку між вхідними параметрами продукту та кінематичними характеристиками виконуючого механізму наповнювачів поршневого типу, які дозують за обсягом, є актуальною задачею для визначення потужності електродвигуна на процес дозування.

Метою дослідження є отримання залежності, що описує відношення сил тиску на одиничний об'єм рідини і інерційними силами до сил в'язкості.

Для рішення цієї задачі запропоновано скористатись методом аналізу розмірностей. Після отримання залежності в числах подібності у програмі Gambit будується за розмірами робоча зона дозатора. Призначаються вхід і вихід продукту, стінки робочої камери. Потім будується карта робочої зони у вигляді сітки і експортується в програму Fluent. В цій програмі задаються параметри продукту (в'язкість і щільність) і граничні умови (швидкість переміщення поршня), ініціалізуються параметри робочої зони і проводяться необхідні обчислення.

Наповнення продуктами консервної тари, це важливий технологічний процес при виготовленні консервованих продуктів. Фасування в тару визначеної кількості продукту, здійснюють спеціальним устаткуванням. Це устаткування відділяє певну кількість продукту, і направляє в консервну тару. Використовують два способи наповнення тари – за обсягом та за рівнем. Механізми, що реалізують спосіб за обсягом – дозувальні, а за рівнем – називають наповнювальними.

Класифікація такого обладнання наступна:

- по механізації – неавтоматичні, напівавтоматичні, автоматичні;
- по методу утворення тиску – гравітаційні, атмосферні, вакуумні, комбіновані;
- по конструкції – лінійні та карусельні;
- по кількості наповнювальних робочих органів – на однопозиційні та багатопозиційні;
- за властивостями фасованих продуктів – для сипучих, рідких мало в'язких і в'язких пластичних.

Наповнювач, що розглядається А9-КНЕ відноситься до напівавтоматичних, поршневих, лінійного типу, однопозиційних наповнювачів для в'язких продуктів з дозуванням по об'єму.

Дозуючі пристрої призначені для забезпечення потрібної кількості продукту або сировини з необхідною точністю. Робочий цикл – дискретний, принцип дії за обсягом. При дискретному фасуванні відбувається повторення робочих циклів, а при об'ємному способі дозування, пристрій відміряє потрібну порцію за допомогою певного обсягу мірника.

Машина А9-КНЕ призначена для об'ємного дозування та фасування харчових продуктів з в'язкістю від 0,4 до 8 Па с в скляні та жерстяні банки. Доза продукту формується при ході поршня. Поршень переміщається за допомогою приводу, який являє собою кулак з вбудованим кривошипом, від кривошипа через механізм важеля і пару конічних колес обертальний рух передається на золотник дозатора. При ході поршня в іншому напрямку продукт витискається в банку.

Метою дослідження є отримання залежності, що описує відношення сил тиску на одиничний об'єм рідини і інерційними силами до сил в'язкості.

Для рішення цієї задачі скористуємось методом аналізу розмірностей.

Більшість розмірностей може бути виражена через розмірність основних величин і називаються похідними величинами.

Основним положенням, яке використовується в методі аналізу розмірностей при знаходженні кількості та виду чисел подібності, є аксіома про те, що складатися і відніматися можуть тільки величини, що мають однакову розмірність, а також та обставина, що одні розмірності виражаються через інші у вигляді їх перемноження в відповідних ступенях. На цій основі встановлюється, що якщо будь-яка фізична величина знаходиться як функція інших фізичних величин, то ця залежність може бути представлена у вигляді добутку цих розмірностей у деяких ступенях.

Складемо параметричну модель рис. 1

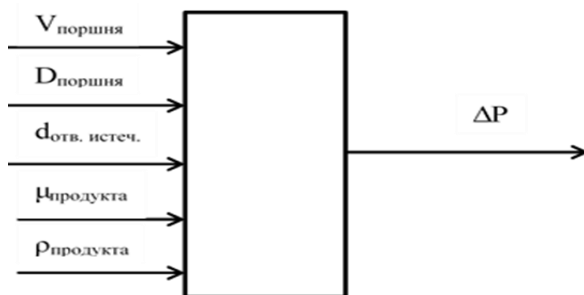


Рис. 1. Параметрична модель

З параметричної моделі виходить, що тиск (ΔP) залежить від вхідних параметрів: швидкості поршня (V поршня), його діаметра (D поршня), діаметра отвору витікання (d витікання), в'язкості продукту (μ), щільності продукту (ρ).

Таким чином, залежність має вид:

$$\Delta P = f(V, D, d, \mu, \rho) \quad (1)$$

З (1) число незалежних параметрів $a=6$.

Представимо ці параметри через загальноприйняті одиниці виміру:

$$\Delta P = \text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \quad (2)$$

Тобто:

$$[\Delta P] = [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}] \quad (3)$$

де M – маса, кг; L – довжина, м; T – час, с

Аналогічно:

Швидкість: $[V] = \frac{M}{c} = [L \cdot T^{-1}]$;

Діаметр поршня: $[D] = [M] = [L]$;

Діаметр отвору для виходу продукту: $[d] = [M] = [L]$;

в'язкість продукту: $[\mu] = Pa \cdot c = \frac{K^2}{M \cdot c} = [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}]$;

густина продукту: $[\rho] = \frac{K^2}{M^3} = [M \cdot L^{-3}]$;

Тоді:

$$\pi = a - b = 6 - 3 = 3 \tag{4}$$

Згідно з принципом аналізу розмірності:

$$\Delta P = A \cdot V^n \cdot D^m \cdot d^k \cdot \mu^p \cdot \rho^q \tag{5}$$

$$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}] = [L \cdot T^{-1}]^n \cdot [L]^m \cdot [L]^k \cdot [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}]^p \cdot [M \cdot L^{-3}]^q \tag{6}$$

Для вирішення цього завдання складаємо матрицю:

Таблиця 1

Розмірна матриця

	n	m	k	p	q	ΔP
M	0	0	0	1	1	1
L	1	1	1	-1	-3	-1
T	-1	0	0	-1	0	-2

На основі матриці виходить система алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} p + q = 1 \\ n + m + k - p - 3q = -1 \\ -n - p = -2 \end{cases} \tag{7}$$

Звідки:

$$\begin{aligned} q &= 1 - p \\ n &= 2 - p \end{aligned} \tag{8}$$

Вирішуємо рівняння (7) щодо двох невідомих:

$$2 - p + m + k - p - 3(1 - p) = 1 \tag{9}$$

Маємо:

$$\begin{aligned} m + k + p &= 0 \\ k &= -m - p \end{aligned} \tag{10}$$

Тоді:

$$\Delta P = A \cdot [V]^{2-p} \cdot [D]^m \cdot [d]^{-m-p} \cdot [\mu]^p \cdot [\rho]^{1-p} \tag{11}$$

розкриваємо дужки:

$$\Delta P = A \cdot V^{2-p} \cdot D^m \cdot d^{-m-p} \cdot \mu^p \cdot \rho^{1-p} \tag{12}$$

Параметри з однаковими показниками ступеня треба об'єднати:

$$\frac{\Delta P}{V^{2-p} \cdot \rho^{1-p}} = A \left(\frac{\mu}{V \cdot d}\right)^p \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^m \tag{13}$$

Видно, що отримана залежність відомих чисел подібності (Eu) і (Re) і параметричного комплексу (D/d) який характеризує геометричні особливості об'єкта.

або:

$$\frac{\Delta P}{V^{2-p} \cdot \rho^{1-p}} = A \left(\frac{V \cdot d}{\mu}\right)^{-p} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^m \tag{14}$$

остаточно маємо:

$$Eu = A \cdot Re^{-p} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^m \tag{15}$$

Число подібності Ейлера $Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot V^2}$ це безрозмірний коефіцієнт, який присутній в рівняннях Нав'є – Стокса. Він демонструє відношення між тиском на об'єм рідини і силами інерції.

Число подібності Рейнольдса – це відношення сил інерції в потоці, до сил в'язкості. Густина в чисельнику залежності $Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}$ демонструє інерцію часток, які відхиляються від руху по прямій, а в'язкість в знаменнику демонструє, що рідина перешкоджає цьому відхиленню.

Потужність встановленого на машині двигуна є функція від ΔP, тобто:

$$N = f(\Delta P) \tag{16}$$

Тоді змінюючи одні й фіксуєючи інші величини входять в залежність (1) можна визначити мінімальну величину витраченої потужності на технологічний процес об'ємного наповнення тари продуктом. Складемо таблицю можливих варіантів варійованих і фіксуються змінних.

Таблиця 2

Таблиця можливих варіантів варійованих і фіксуються змінних

№.№	P ₁ (кг)	D (м)	d (м)	μ (кг/м ³ ·с)
1	const	const	var	const
2	var	const	const	const
3	const	const	const	var
4	const	var	const	const

де P₁ – навантаження на шток поршня, кг;
 D – діаметр поршня, м;
 d – діаметр отвору витікання, м;
 μ – в'язкість продукту, кг/м³·с, величину в'язкості можна міняти побічно - змінюючи температуру продукту.

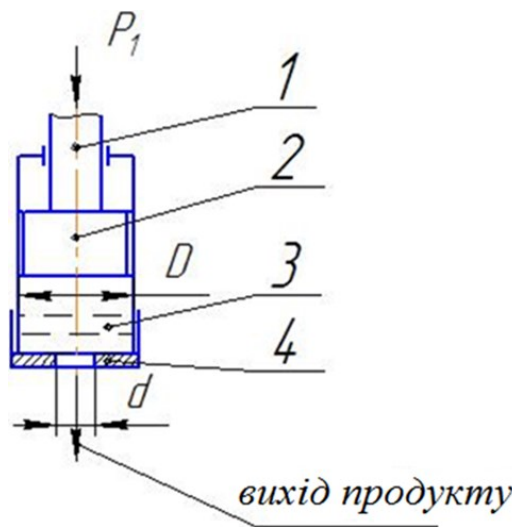


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 - шток поршня, 2 - поршень, 3 - камера з продуктом, 4 - змінна шайба з отвором

Моделювання процесу в програмі GAMBIT і FLUENT

У програмі Gambit будується за розмірами робоча зона. Призначаються вхід і вихід продукту, стінки робочої камери. Потім будується карта робочої зони у вигляді сітки і експортується в програму Fluent. В цій програмі задаються параметри продукту (в'язкість і щільність) і граничні умови (швидкість переміщення поршня), ініціалізуються параметри робочої зони і робляться необхідні обчислення. За результатами обчислень отримані наступні карти.

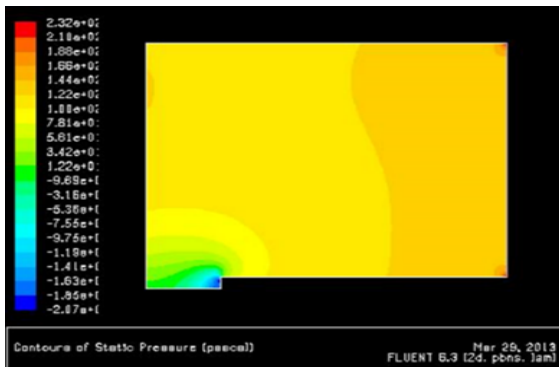


Рис. 3. Контурна карта розподілу статичного тиску в робочій зоні.

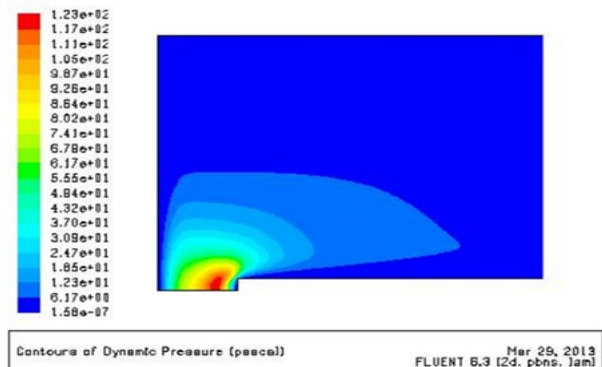


Рис. 4. Контурна карта розподілу динамічного тиску в робочій зоні.

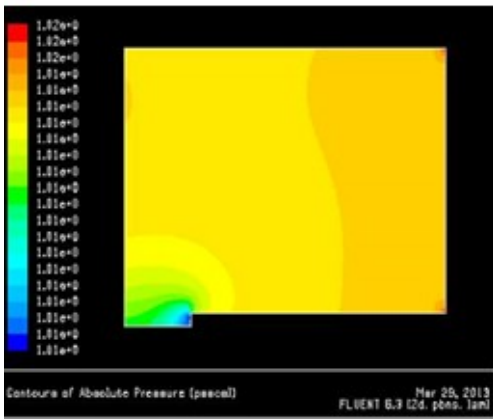


Рис.5. Контурна карта розподілу абсолютного тиску в робочій зоні

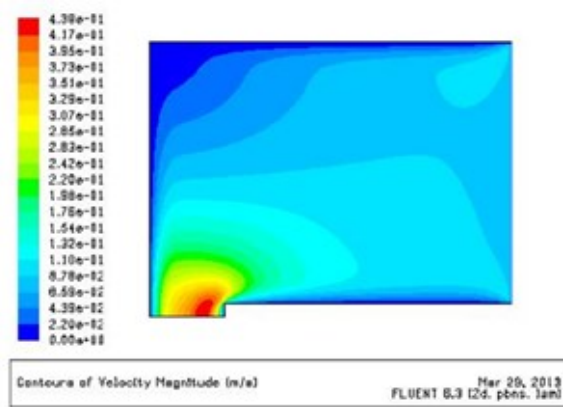


Рис.6. Контурна карта розподілу швидкостей в робочій зоні

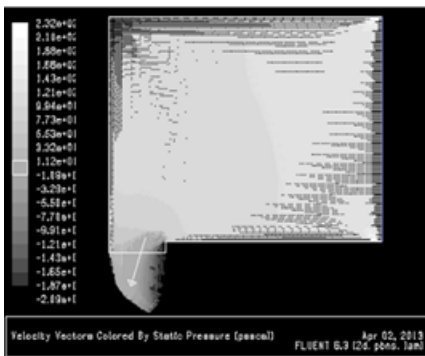


Рис.7. Векторна карта розподілу швидкостей від статичного тиску в робочій зоні

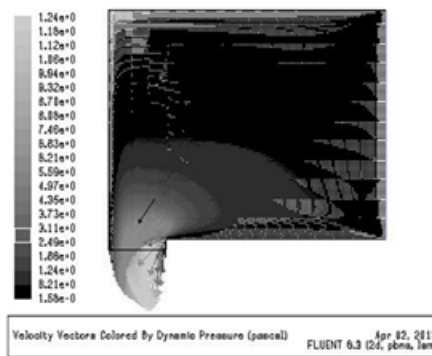


Рис.8. Векторна карта розподілу швидкостей від динамічного тиску в робочій зоні

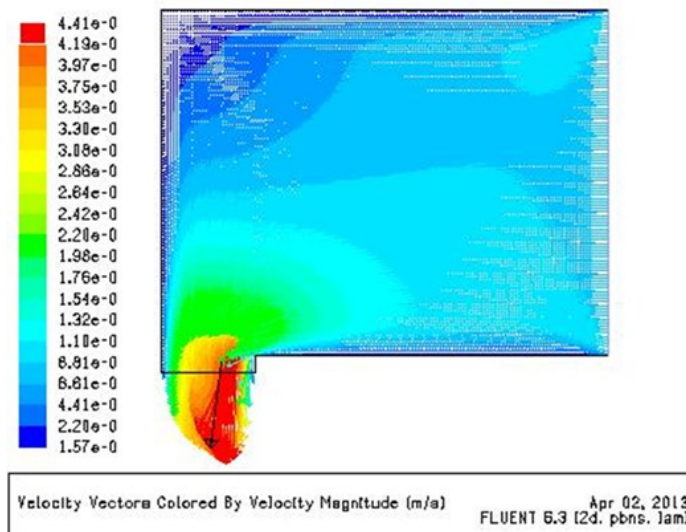


Рис.5. Векторна карта розподілу швидкостей в робочій зоні

З параметричної моделі випливає, що цікавить нас вихідний параметр ΔP . Варіюючи діаметри вихідного отвору для продукту: від 15 до 25 мм з кроком 5 мм, і розрахувавши швидкості продукту на виході з рівняння суцільності, також варіюючи отримані значення з кроком 0,1 м / с, розраховуємо числа Ейлера і Рейнольдса.

З параметричної моделі і методу аналізу розмірностей була отримана залежність (15):

$$Eu = A \cdot Re^{-p} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^m$$

в якій невідомі показники ступенів. Їх можна знайти або за допомогою експерименту або за допомогою моделювання. Визначимо ці показники за допомогою моделювання. Для цього необхідно розрахувати числа Ейлера і Рейнольдса за відповідними формулами:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot v^2} \tag{17}$$

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \tag{18}$$

Отримані розрахункові дані зводимо в таблицю:

Таблиця 3

V_{var}	Eu	Re	D/d	d_{var}
	z	x	y	
0.379	1.679	10.1	4	d = 25mm $\Delta P = 308.74$ Па
0.479	1.051	12.77	4	
0.579	0.72	15.44	4	
0.679	0.523	18.12	4	
0.779	0.397	20.77	4	
0.879	0.312	23.44	4	
0.979	0.252	26.12	4	
1.079	0.207	28.77	4	
1.16	0.243	27.74	5	d = 20 mm $\Delta P = 418.81$ Па
1.26	0.206	26.88	5	
1.36	0.177	29.01	5	
1.46	0.153	31.15	5	
1.56	0.134	33.28	5	
1.66	0.119	35.41	5	
1.76	0.106	37.54	5	
1.89	0.092	40.32	5	
1.89	0.158	30.24	6.66	d = 15 mm $\Delta P = 725,83$ Па
1.99	0.143	31.84	6.66	
2.09	0.128	33.44	6.66	
2.19	0.118	35.04	6.66	
2.29	0.108	36.64	6.66	
2.39	0.099	38.24	6.66	
2.49	0.0914	39.84	6.66	
2.59	0.084	41.44	6.66	
2.69	0.078	43.04	6.66	

Логарифмуємо рівняння в числах подібності:

$$\lg Eu = \lg A + p \lg Re + m \lg \left(\frac{D}{d}\right) \quad (19)$$

Логарифмуємо дані таблиці 3.

Таблиця 4

Eu	Re	D/d
z	x	y
0.225	1.004	0.602
0.0216	1.106	0.602
-0.142	1.188	0.602
-0.281	1.258	0.602
-0.401	1.317	0.602
-0.505	1.369	0.602
-0.598	1.416	0.602
-0.684	1.458	0.602
-0.614	1.393	0.698
-0.686	1.429	0.698
-0.752	1.462	0.698
-0.815	1.493	0.698
-0.872	1.524	0.698
-0.924	1.544	0.698
-0.974	1.574	0.698
-1.03	1.605	0.698
-0.801	1.480	0.823
-0.844	1.502	0.823
-0.892	1.524	0.823
-0.928	1.544	0.823
-0.966	1.563	0.823
-1.004	1.582	0.823
-1.039	1.6	0.823
-1.075	1.617	0.823
-1.107	1.633	0.823

Потім, користуючись програмою TableCurve 3D за табличними даними, будуємо поверхню, яка описується запропонованою розрахунковою програмою залежністю. У цій залежності присутні коефіцієнти при змінних. Ці коефіцієнти шукані в нашому рівнянні в числах подібності, але їх необхідно перерахувати:

$$A = 1,921$$

$$p = 10^{-0.815} = 0.153$$

$$m = 10^{-1.909} = 0.0123$$

коefficient 2.prn, X , Y , Z

$$r^2=0.73 \quad z = a+bx+cy$$

$$a = 1.9211739, b = -0.81585531, c = -1.9099824$$

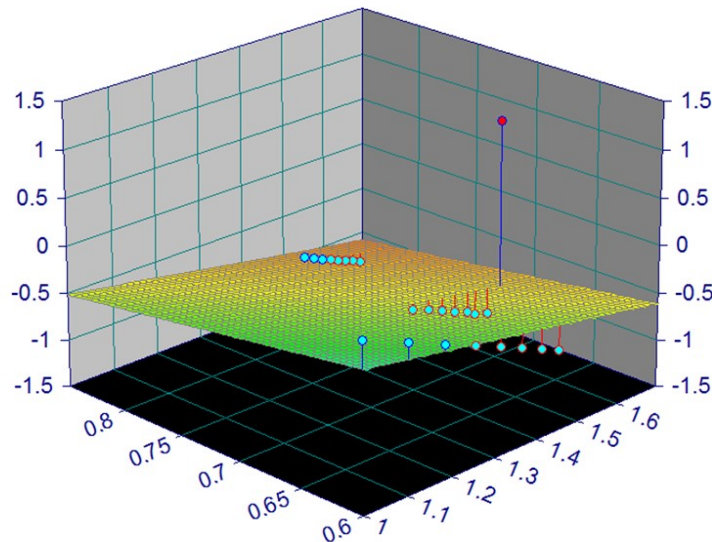


Рис. 10. Побудова поверхні

Остаточно отримуємо:

$$Eu = 1.921 Re^{-0.153} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.0123} \quad (20)$$

Висновок

Отримана залежність описує відношення між силами тиску на одиничний обсяг рідини (або газу) та інерційними силами до сил в'язкості.

За отриманою залежністю, варіюючи діаметри входу і виходу для продукту і змінюючи швидкість переміщення поршня можна визначити тиск ΔP , який безпосередньо впливає на потужність, що витрачається.

Література

1. Бурдо О.Г. Прикладне моделювання процесів перенесення в технологічних системах : підручник / О. Г. Бурдо, Л. Г. Калінін. – Одеса : Друк, 2008. – 348 с. : іл. 87.
2. Гладушняк О.К. Технологічне обладнання консервних заводів : підр. / О.К. Гладушняк. – Херсон : Грінь Д.С., 2015 – 348 с.
3. Тertiшній О.О. Механічні процеси та обладнання харчових виробництв : навч. посіб. / О. О. Тertiшній, О. А. Пиво В. С. Кошулько ; Дніпров. держ. аграр.-екон. ун-т. – Дніпро : ДДАЕУ, 2022. – 351 с.
4. Конструкції і розрахунки машин та апаратів переробних виробництв : підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко та ін. ; Тавр.держ. агротехнол. ун-т ім. Д. Моторного. – Мелітополь : ПрофКнига, 2021. – 320 с.

References

1. Burdo O.H. Prykladne modeliuвання protsesiv perenesennia v tekhnolohichnykh systemakh : pidruchnyk / O. H. Burdo, L. H. Kalinin. – Odessa : Druk, 2008. – 348 s. : il. 87.
2. Hladushniak O.K. Tekhnolohichne obladnannia konservnykh zavodiv : pidr. / O.K. Hladushniak. – Kherson : Hrin D.S., 2015 – 348 s.
3. Tertyshnyi O.O. Mekhanichni protsesy ta obladnannia kharchovykh vyrobnytstv : navch. posib. / O. O. Tertyshnyi, O. A. Pivo V. S. Koshulko ; Dniprov. derzh. ahrar.-ekon. un-t. – Dnipro : DDAEU, 2022. – 351 s.
4. Konstruktsii i rozrakhunky mashyn ta aparativ pererobnykh vyrobnytstv : pidruchnyk / V. S. Boiko, K. O. Samoichuk, V. H. Tarasenko ta in. ; Tavr.derzh. ahrotekhnol. un-t im. D. Motornoho. – Melitopol : ProfKnyha, 2021. – 320 s.