**IV. НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ****Пономарчук І. А.****Вінницький  
національний  
технічний  
університет****Левицька Г. І.****Вінницький  
експертно-технічний  
центр****УДК 621.542****ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ  
ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ  
ПОВІТРЯ В РОБОЧИХ  
КАМЕРАХ ДВОСТОРОННІХ  
ПНЕВМОУДАРНИХ ВУЗЛІВ**

*Исследована динамика процессов изменения параметров воздуха в рабочих камерах двусторонних пневмоударных узлов на отдельных этапах с применением основных уравнений состояния идеального газа, первого закона термодинамики, уравнения равновесия поршня, которые характеризуют основные этапы работы пневмоударного узла. Модель учитывает изменение площади выпускных отверстий и расходной функции в процессе их закрытия и открытия.*

*The dynamics of processes of change of parameters of air is explored in the working chambers of bilateral pneumatic shock knots on separate stages with the use of basic equalizations of the state of ideal gas, first law of thermodynamics, equalization of equilibrium of piston, which characterize the basic stages of work of pneumatic shock knot, is offered. A model takes into account the change of area of tape-holes and expense function in the process of their closing and opening.*

**Вступ та постановка задачі дослідження.**

Для розробки нових конструкцій двосторонніх пневмоударних вузлів важливою задачею є визначення змін параметрів повітря в робочих камерах. Задачею даної статті є дослідження таких параметрів як тиск, швидкість, витратна функція.

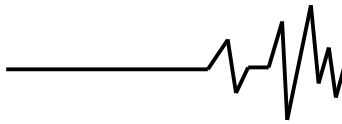
Використання існуючих математичних моделей процесів зміни параметрів повітря в робочих камерах двосторонніх пневмоударних вузлів [1, 2] не дозволяє отримати дані, які відповідають експериментальним значенням, оскільки не були враховані: 1) зміна площі повітровипускних і повітровпускних отворів в період їх відкривання і закривання; 2) зміна витратної функції.

Актуальною є також задача удосконалення відомих математичних моделей, їх дослідження для узгодження даних з робочими характеристиками двостороннього пневмоударного вузла.

**Вихідні передумови.**

При роботі даного типу пневмоударного вузла, розрізняють наступні етапи зміни параметрів повітря в робочих камерах:

- впуск повітря в камеру зворотного ходу, та початок закривання випуску в робочій камері, при цьому тиск в робочій камері знижується за рахунок зменшення кількості повітря, а в камері зворотного ходу підвищується, за рахунок збільшення кількості повітря;
- початок закривання впуску повітря в камеру зворотного ходу, при зміні площі повітровпускних отворів, в робочій камері випуск припинився і починається стискання;
- розширення повітря в камері зворотного ходу (тиск в даній камері знижується), стискання повітря в робочій камері (тиск в даній камері підвищується), на даному етапі зміна кількості повітря в камерах відсутня;
- початок випуску повітря з камери зворотного ходу (тиск повітря знижується), в робочій камері стискання повітря (тиск повітря підвищується);
- випуск повітря з камери зворотного ходу, при зміні площі повітровипускних отворів, (тиск повітря знижується), початок впуску повітря в камеру робочого ходу, при зміні площі повітровпускних отворів (тиск повітря підвищується). На цьому етапі відбувається



зупинка поршня, тому наступні етапи будуть описувати рух поршня в зворотну сторону.

Основні положення відомих розробок мають наступні припущення, що використанні при розробці математичної моделі зміни параметрів повітря в робочих камерах двосторонніх пневмоударних вузлів:

- швидкоплинні термодинамічні процеси зміни стану повітря в робочих камерах відбуваються без теплообміну з навколишнім середовищем і їх можна вважати адіабатними [1, 7];

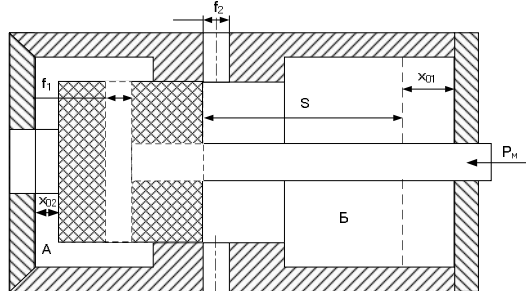
- термодинамічні процеси, які відбуваються на окремому етапі (за елементарний період часу) вважаються квазістаціонарними, тобто такими, за яких параметри повітря (тиск, температура, густина) в усіх точках об'єму камери однакові (при сталому об'ємі їх протікання) [2, 6];

- величина абсолютного тиску в магістралі становить  $p_M = 0,6$  МПа, що дозволяє розглядати стиснуте повітря як ідеальний газ [3, 7].

**Розв'язок задачі.**

При дослідженні математичної моделі процесів зміни параметрів повітря на основних етапах роботи двостороннього пневмоударного вузла були застосовані, як базові рівняння стану ідеального газу, рівняння адіабати, перший закон термодинаміки та рівняння рівноваги поршня на основі яких створено диференціальні рівняння, що відтворюють зміну тиску, витратної функції, при зміні положення поршня.

Для дослідження динаміки зміни основних параметрів повітря в робочих камерах А і Б пневмоударного вузла на першому етапі (рис. 1), що характеризується впусканням повітря в камеру А, при постійній величині площі повітровпускних отворів  $f_1$ , та скиданням повітря з камери Б, при зміні величини площі повітровпускних отворів  $f_2$ , до повного їх закриття, розроблена система рівнянь (1).



**Рис. 1. Схема двостороннього пневмоударного вузла на першому етапі зміни параметрів повітря**

$$\begin{cases}
 \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_A}{m} \cdot p_{A1} - \frac{F_A}{m} \cdot p_{A1} - \frac{P_1}{m} \\
 \frac{d}{dt} \cdot \delta_{A1}(t) = - \frac{k \cdot f_2^{\frac{1}{2}}(x) \cdot n_2 \cdot K \cdot \delta_{A1}^{\frac{2k-1}{2k}} \cdot \sqrt{RT_A}}{F_A \cdot (x_{01} + S) \cdot D^{2k}_M} \cdot \varphi\sigma_{A1}(t) + \frac{k \cdot \delta_{A1}(t) \cdot v(t)}{x_{01} + S} \\
 f^{\circ}_2(x) = -7 \cdot \sqrt{r_2^2 - (x(t) - r_2)^2} \\
 \frac{d}{dt} \cdot p_{A1}(t) = \frac{k \cdot f_1^{\frac{1}{2}} \cdot K \cdot P_M \cdot \sqrt{RT_1}}{F_A \cdot x_{02}} \cdot \varphi\sigma_{A1}(t) - \frac{k \cdot p_{A1}(t) \cdot v(t)}{x_{02}} \\
 \varphi\sigma_{A1}(t) = \begin{cases} 0.25880 \cdot \gamma \cdot \delta_{A1} & 0 \leq \frac{p_{A1}(t)}{P_M} \leq 0.528 \\ \sqrt{\left(\frac{p_{A1}(t)}{P_M}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{A1}(t)}{P_M}\right)^{\frac{k-1}{k}}} & \end{cases} \\
 \varphi\sigma_{A1}(t) = \begin{cases} 0.25880 \cdot \gamma \cdot \delta_{A1} & 0 \leq \frac{p_{A1}(t)}{P_M} \leq 0.528 \\ \sqrt{\left(\frac{p_{A1}(t)}{P_M}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{A1}(t)}{P_M}\right)^{\frac{k-1}{k}}} & \end{cases}
 \end{cases} \quad (1)$$

де  $m$  – маса рухомих частин пневмоударного вузла;  $F_B, F_A$  – площа торця поршня в камері А і Б;  $p_{A1}, p_{B1}$  – тиск в камері А і Б на першому етапі;  $P_a$  – атмосферний тиск повітря біля випускних отворів;  $P_M$  – тиск повітря в магістралі;  $P_1$  – сила опору рухові поршня (результуюча всіх сил опору за винятком сили, створеної стисненим повітрям в камері стискування);  $k$  – коефіцієнт адіабати;  $T_M, T_B$  – температура мережного повітря і повітря в камері Б;  $R$  – газова стала;  $f_2^e, f_1^e$  – ефективна площа прохідного перетину повітровпускних та повітровпускних пневмоліній в камеру А і Б;  $n$  – кількість повітровпускних отворів;  $n_2$  – кількість повітровпускних отворів;  $S$  – хід поршня;  $x_{02}$  – відстань з якої починається рух поршня;  $x_{01}$  – відстань до якої доходить поршень;  $x$  – величина переміщення поршня;  $r_2$  – радіус повітровпускних отворів;  $v$  – швидкість переміщення поршня;  $K = \sqrt{\frac{2k}{k-1}}$  –

безрозмірний коефіцієнт;  $\varphi\sigma_{A1}(t), \varphi\sigma_{B1}(t)$  – функція витрати повітря в камері А і Б;  $d_1$  – діаметр повітровпускних отворів в камеру А і Б;  $d_2$  – діаметр повітровпускних отворів з камери А і Б.

Початковими умовами для вирішення системи рівнянь на першому етапі є момент зупинки поршня після нанесення удару, при якому швидкість  $v(0) = 0$  м/с,  $x(0) = 0$  м, тиск в камері А дорівнює половині магістрального, а тиск в камері Б ще не досягнув атмосферного.

Початковими умовами для послідовних етапів є кінцеві умови попередніх етапів.

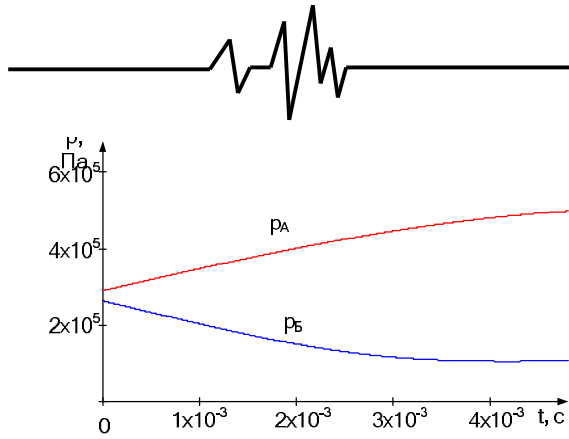


Рис. 2. Діаграма зміни тиску в камерах А і Б на першому етапі

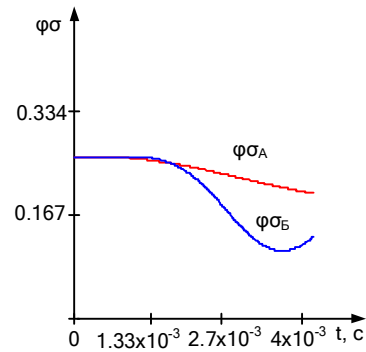


Рис. 6. Діаграма зміни витратної функції в камерах А і Б на першому етапі

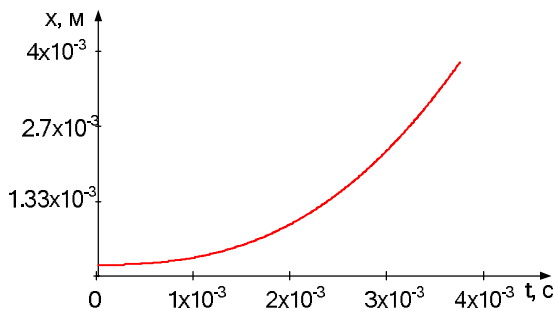


Рис. 3. Діаграма переміщення поршня на першому етапі

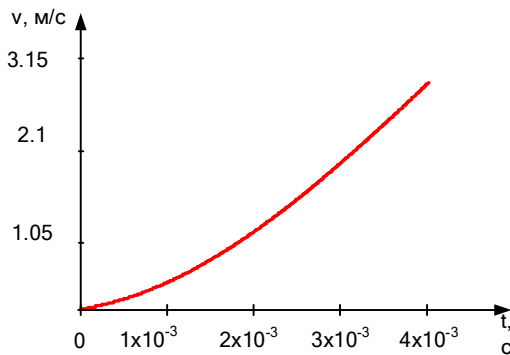


Рис. 4. Діаграма зміни швидкості руху поршня на першому етапі

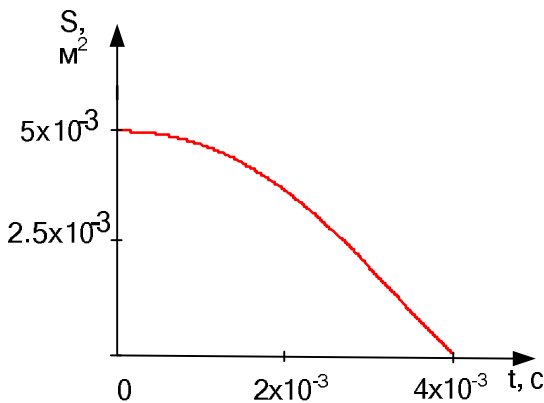


Рис. 5. Діаграма зміни площі повітровипускних отворів f\_2 в камері Б на першому етапі

Другий етап (рис. 7) характеризується стисканням повітря в робочій камері Б без зміни маси, та початком закриття впуску повітря в камеру зворотного ходу А, при зміні величини площі повітровпускних отворів  $f_1$ , при цьому величина ходу поршня, який здійснено на попередній фазі враховується введенням величини  $l_1$ . Даний етап описується системою рівнянь (2).

На даному етапі в камері А тиск зростає до моменту повного закриття повітровпускних отворів  $f_1$  (рис. 8, 12) і незначне підвищення тиску в камері А за рахунок стискання повітря (рис. 8).

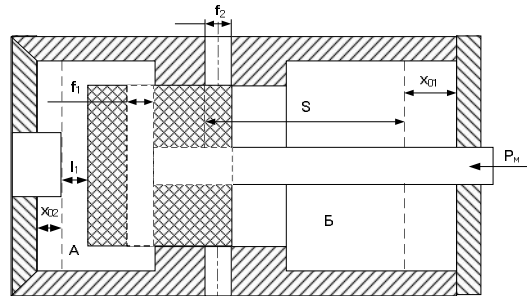
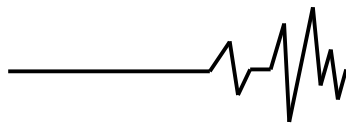


Рис. 7. Схема двостороннього пневмоударного вузла на другому етапі зміни параметрів повітря

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_A}{m} \cdot p_{A2} - \frac{F_A}{m} \cdot p_{A2} - \frac{P_2}{m} \\ \frac{d}{dt} \cdot p_{A2}(t) = \frac{k \cdot p_{A2}(x_{01} + S + l_1)^k}{(x_{01} + S - l_1 - x(t))^k} \\ f_1^c(x) = -7 \cdot \sqrt{l_1^2 - (x(t) - l_1)^2} \\ \frac{d}{dt} \cdot p_{A2}(t) = \frac{k \cdot f_1^c(x) \cdot p \cdot K \cdot P_M \cdot \sqrt{RT_1}}{F_A \cdot (x_{02} + l_1)} \cdot \varphi\sigma_{A2}(t) - \frac{k \cdot p_{A2}(t) \cdot v(t)}{x_{02} + l_1} \\ \varphi\sigma_{A2}(t) = \begin{cases} 0.25880 \text{ үеїї} & 0 \leq \frac{p_{A2}(t)}{P_M} \leq 0.528 \\ \sqrt{\left(\frac{p_{A2}(t)}{P_M}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{A2}(t)}{P_M}\right)^{\frac{k-1}{k}}} & \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$



де  $l_2$  – величина переміщення поршня на другому етапі;  $p_{A2}$ ,  $p_{B2}$  – тиск в камері А і Б на другому етапі;  $p_{B2п}$  – тиск в камері Б на початку другого етапу.

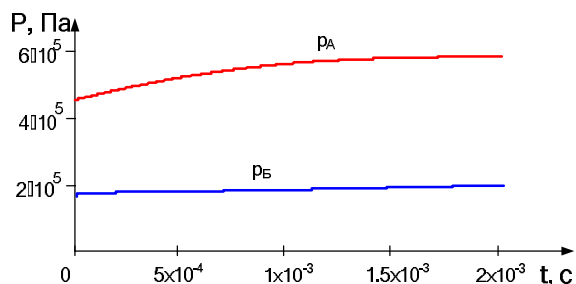


Рис. 8. Діаграма зміни тиску в камерах А і Б на другому етапі

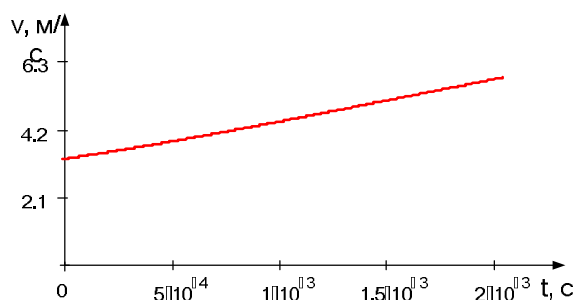


Рис. 9. Діаграма зміни швидкості руху поршня на другому етапі

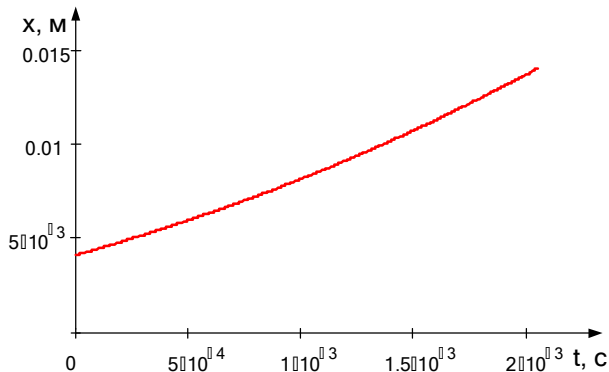


Рис. 10. Діаграма переміщення поршня на другому етапі

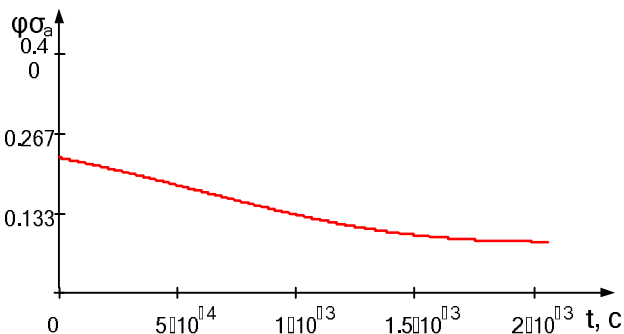


Рис. 11. Діаграма зміни витратної функції в камерах А і Б на другому етапі

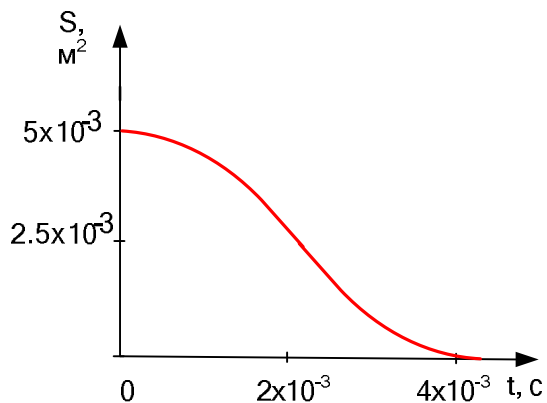


Рис. 12. Діаграма зміни площі повітровпускних отворів  $f_1$  в камері А на другому етапі

Третій етап при якому повністю закриті повітровпускні  $f_1$  та повітровипускні  $f_2$  отвори і здійснюється розширення повітря в камері А та стискання повітря в камері Б (рис.13, 14, 15, 16), описується системою рівнянь (3).

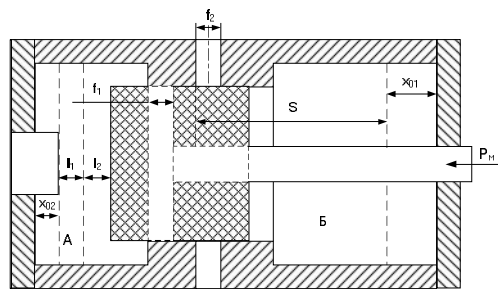


Рис. 13. Схема двостороннього пневмоударного вузла на третьому етапі зміни параметрів повітря

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_A}{m} \cdot p_{A3} - \frac{F_B}{m} \cdot p_{B3} - \frac{P_3}{m} \\ \frac{d}{dt} \cdot p_{A3}(t) = \frac{k \cdot p_{A3i} (x_{01} + S - l_1 - l_2)^k}{(x_{01} + S - l_1 - l_2 - x(t))^k} \\ \frac{d}{dt} \cdot p_{B3}(t) = \frac{k \cdot p_{B3i} (x_{02} + l_1 + l_2)}{(x_{02} + l_1 + l_2 + x(t))^k} \end{cases} \quad (3)$$

де  $l_2$  – величина переміщення поршня на другому етапі;  $p_{A3}$ ,  $p_{B3}$  – тиск в камері А і Б на третьому етапі;  $p_{B3п}$ ,  $p_{A3п}$  – тиск в камерах Б і А, відповідно, на початку третього етапу.

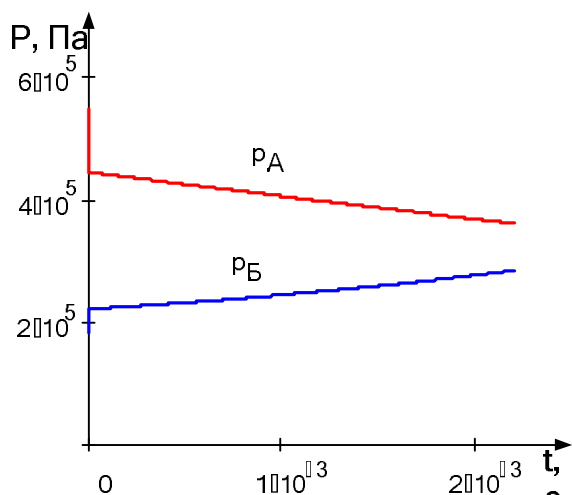
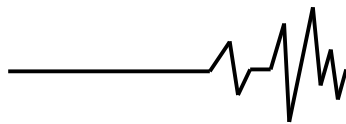


Рис. 14. Діаграма зміни тиску в камерах А і Б на третьому етапі

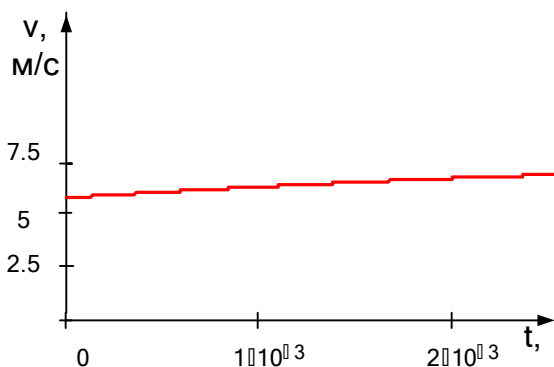


Рис. 15. Діаграма зміни швидкості руху поршня на третьому етапі

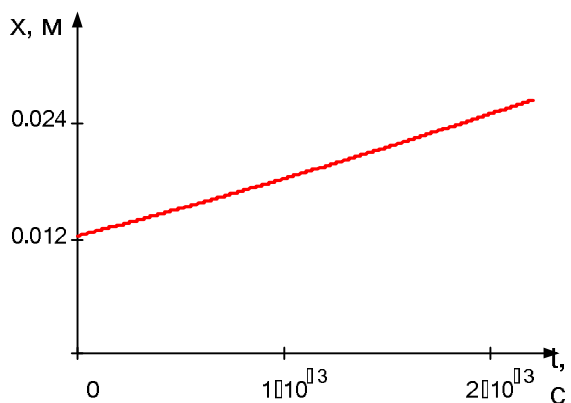


Рис. 16. Діаграма переміщення поршня на третьому етапі

На четвертому етапі починається скидання повітря з камери А (тиск знижується), при зміні величини площі повітровипускних отворів  $f_2$ , в камері Б -

стискання повітря ( тиск підвищується). Даний етап описується системою рівнянь (4) та відображений на рис.17, 18, 19, 20, 21, 22.

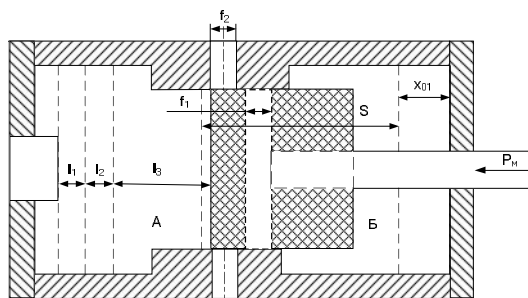


Рис. 17. Схема двостороннього пневмоударного вузла на четвертому етапі зміни параметрів повітря

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_A}{m} \cdot p_{A4} - \frac{F_A}{m} \cdot p_{A4} - \frac{P_4}{m} \\ \frac{d}{dt} \cdot p_{A4}(t) = -\frac{k \cdot p_{A4}(x_{01} + S - l_1 - l_2 - l_3)^k}{(x_{01} + S - l_1 - l_2 - l_3 - x(t))^k} \\ f_{22}^2(x) = 7 \cdot \sqrt{v_2^2 - (x(t) - r_2)^2} \\ \frac{d}{dt} \cdot p_{A4}(t) = -\frac{k \cdot f_{22}^2(x) \cdot n_2 \cdot K \cdot \delta_{A4}^{\frac{3k-1}{2k}} \cdot \sqrt{RT_A}}{F_A \cdot (x_{02} + l_1 + l_2 + l_3) \cdot D^{\frac{2k}{M}}} \cdot \varphi_{\sigma_{A4}}(t) + \frac{k \cdot p_{A4}(t) \cdot v(t)}{x_{02} + l_1 + l_2 + l_3} \\ \varphi_{\sigma_{A4}}(t) = \begin{cases} 0.25880 \cdot \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{P_a}{P_{A4}(t)}} \right) & 0 \leq \frac{P_a}{P_{A4}(t)} \leq 0.528 \\ \sqrt{\left( \frac{P_a}{P_{A4}(t)} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_a}{P_{A4}(t)} \right)^{\frac{k-1}{k}}} & \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

де  $l_3$  – величина переміщення поршня на третьому етапі;  $p_{A4}$ ,  $p_{B4}$  – тиск в камері А і Б на четвертому етапі;  $p_{B4П}$  – тиск в камері Б на початку четвертого етапу.

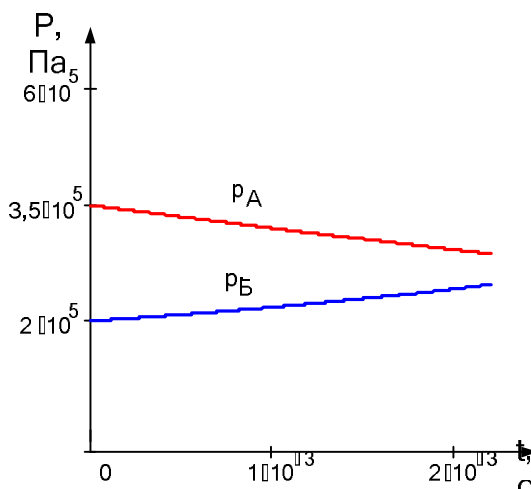
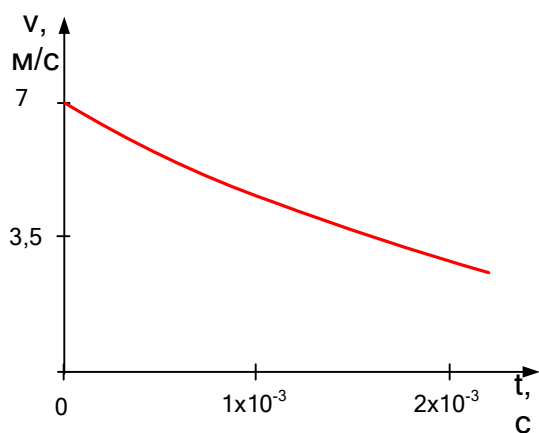
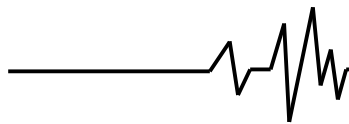
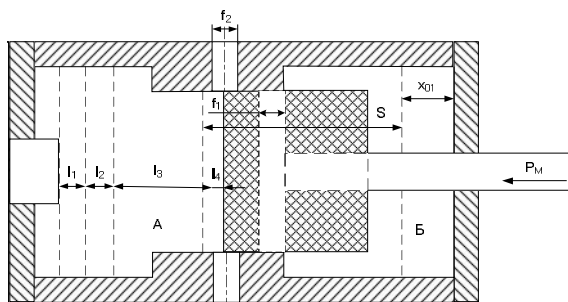


Рис. 18. Діаграма зміни тиску в камерах А і Б на четвертому етапі

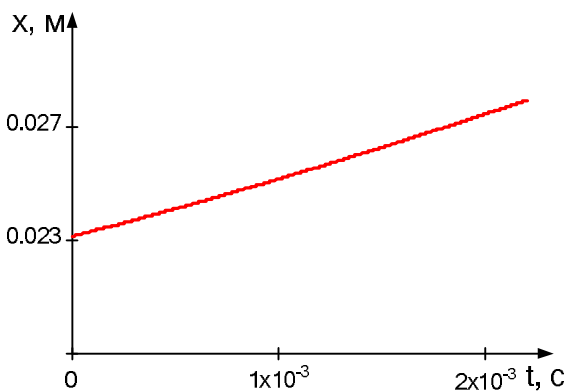


**Рис. 19.** Діаграма зміни швидкості руху поршня на четвертому етапі

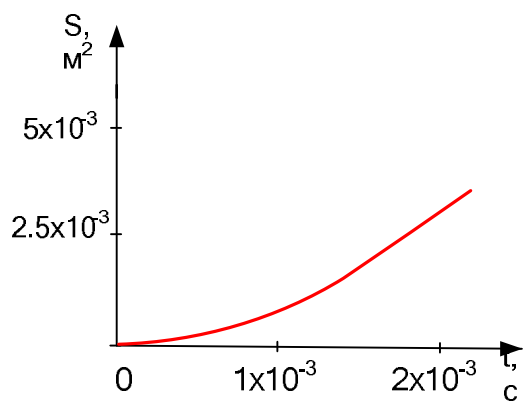
камерах А і Б та зупинки поршня, тому процес описується системою рівнянь (5) і відображений на рис. 22, 23, 24, 25, 26.



**Рис. 22.** Схема двостороннього пневмударного вузла на п'ятому етапі зміни параметрів повітря



**Рис. 20.** Діаграма переміщення поршня на четвертому етапі

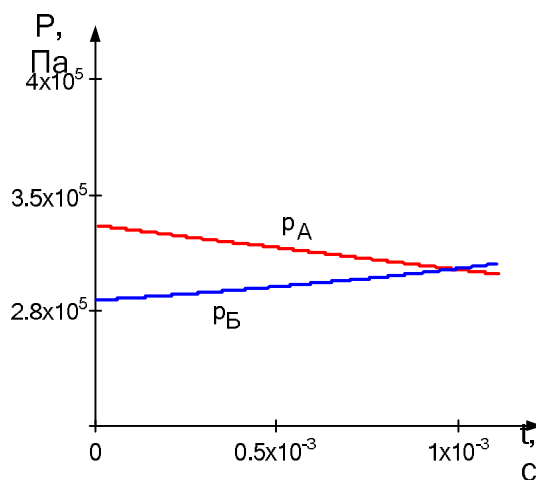


**Рис. 21.** Діаграма зміни площі повітровипускних отворів  $f_2$  в камері А на четвертому етапі

На п'ятому етапі ще здійснюється скидання повітря з камери А (тиск знижується), при змінній величині площі повітровипускних отворів  $f_2$ , в камері Б – починається відкривання впускних отворів (змінюється площа отворів  $f_1$ , тиск підвищується) до моменту врівноваження сил в

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_A \cdot p_{As} - F_A \cdot p_{As} - P_s}{m} \\ f_1^e(x) = 7 \cdot \sqrt{r_1^2 - (x(t) - r_1)^2} \\ \frac{d}{dt} \cdot p_{As}(t) = \frac{k \cdot f_1^k(x) \cdot n \cdot K \cdot P_M \cdot \sqrt{RT_1}}{F_A \cdot (x_{01} + S - l_1 - l_2 - l_3 - l_4)} \cdot \varphi\sigma_{As}(t) - \frac{k \cdot p_{As}(t) \cdot v(t)}{x_{01} + S - l_1 - l_2 - l_3 - l_4} \\ f_2^e(x) = 7 \cdot \sqrt{r_2^2 - (x(t) - r_2)^2} \\ \frac{d}{dt} \cdot p_{As}(t) = - \frac{k \cdot f_2^k(x) \cdot n_2 \cdot K \cdot \delta_{As}^{\frac{3k-1}{2k}} \cdot \sqrt{RT_2}}{F_A \cdot (x_{02} + l_1 + l_2 + l_3 + l_4) \cdot D^{\frac{3k}{2k}}} \cdot \varphi\sigma_{As}(t) + \frac{k \cdot p_{As}(t) \cdot v(t)}{x_{02} + l_1 + l_2 + l_3 + l_4} \end{cases} \quad (5)$$

де  $l_4$  – величина переміщення поршня на четвертому етапі;  $p_{As}$ ,  $p_{B5}$  – тиск в камері А і Б на п'ятому етапі.



**Рис. 23.** Діаграма зміни тиску в камерах А і Б на п'ятому етапі

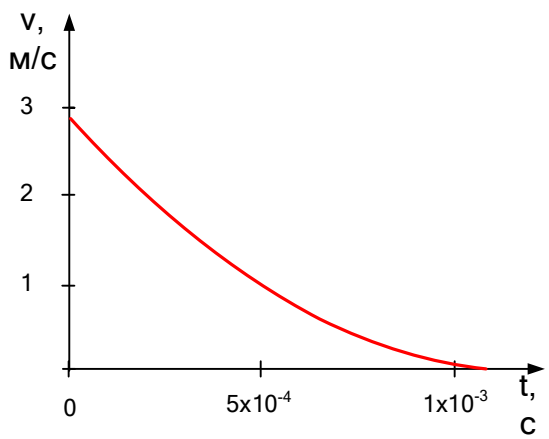
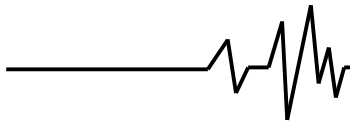


Рис. 24. Діаграма зміни швидкості руху поршня на п'ятому етапі

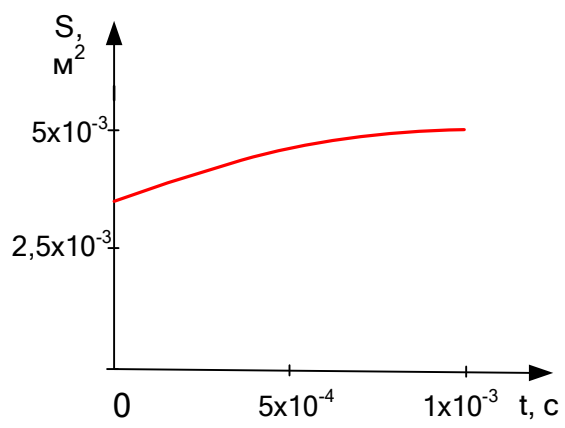


Рис. 25. Діаграма зміни площі повітровипускних отворів  $f_2$  в камері А на п'ятому етапі

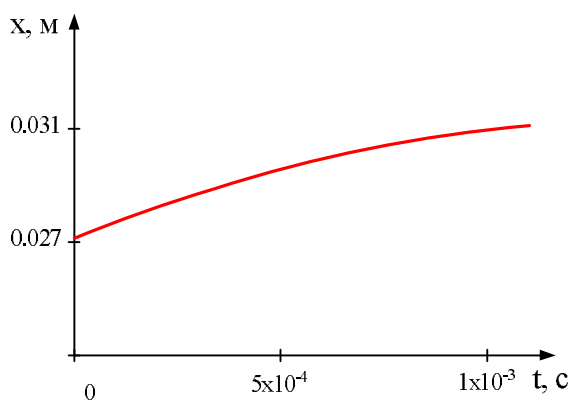


Рис. 26. Діаграма переміщення поршня на п'ятому етапі

Задачею даного етапу є дослідження моменту зупинки поршня та основних характеристик повітря в камерах, які будуть використовуватися, як початкові умови при зворотному русі поршня.

**Висновок**

Досліджена математична модель, на базі розроблених систем рівнянь, що дозволяє розробити нові конструкції двосторонніх пневмоударних вузлів та дослідити процеси зміни тиску, швидкості в робочих камерах на окремих етапах, з максимальним наближенням до експериментальних значень, оскільки були враховані:

- 1) зміна площі повітровипускних і повітровпускних отворів в період їх відкривання і закривання;
- 2) зміна витратної функції.

Виконано коректування диференційного рівняння зміни тиску [1] в період скидання повітря.

**Література**

1. Стасюк В. М. Расчет конструктивных параметров пневматического отбойного молотка / В. М. Стасюк / Вибрации в технике и технологиях // Винницький державний сільськогосподарський інститут. – 2000. – №2. – С.58-53.
2. Ветюков М. М. Динамика пневмоударника с упругим демпфером станков шарошечного бурения / М. М. Ветюков, Д. А. Юнгмейстер, К. А. Лукашов, В. А. Пивнев // Горная механика. – 2002 – №3-4 – С.32-39.
3. Современные погружные ударные машины для бурения скважин [Электронный ресурс] / Липин А. А., Танайно А. С., Тимонин В. В //Серия: Горная Техника – 2006 – №7. – С.21-34. – Режим доступа до журн. : <http://library.stroit.ru/articles/burenie2/index.html>.
4. Воробьев В. Н. Современное оборудование для бурения и зарядания скважин на горных работах / В. Н. Воробьев, В. Я. Заслов, В. Б. Ткачев, С. Н. Трофимов // Горный журнал. – 2008 – № 11. – С. 35-40.
5. Суднишников Б. В. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия / Б. В. Суднишников, Н. Н. Есин, К. К. Тупицын; Отв. ред. А. Д. Костылев – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1985. – 134 с.
6. Пневмоударный пристрій : Пат. 38035А Україна, МКИ 7E21C3/24 А. Ф. Пономарчук, В. М.Стасюк, І. А. Пономарчук. – № 2000052856 бюл. №4, 15.05.2001.
7. Герц Е. В. Приближенный метод расчета новых высокоскоросных пневмомеханических приводов / Е. В. Герц, М. Н. Герц, З. С. Луцкий – М.: Машиностроение, 1983. – 272 с.