

УДК 621.646.4

Ю.М. Рикуніч

ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування», Київ, Україна

Г.Й. Зайончковський, д-р техн. наук

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

С.В. Струтинський, канд. техн. наук,

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ НЕСТАЦІОНАРНИХ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КЛАПАНА ВИСОКОГО ТИСКУ

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению параметров нестационарного течения в проточной части пневматического клапана

The results of theoretical and experimental studies to determine the loads on the moving parts of the electromagnetic actuator pneumatic valve defined gas-dynamic processes in its flow path.

Вступ

Пневматичні електромагнітні клапани (ЕМК) високого тиску широко використовуються в пневматичних системах різного призначення. Вони повинні мати високі показники надійності роботи. Вдосконалення конструкції клапанів потребує вивчення особливостей робочих процесів в їх проточній частині. Тому дослідження газодинаміки ЕМК високого тиску є актуальним.

В останніх дослідженнях і публікаціях розглянуто робочі процеси і характеристики клапанних пристроїв [1, 2]. В основному вони стосуються розробки конструкцій клапанів та законів їх керування [3]. Окремі роботи містять результати досліджень характеристик надійності ЕМК, зокрема визначення їх герметичності [4]. Течія газу в клапанах досліджена в працях [5, 6].

До невирішених актуальних на наш час питань відноситься визначення параметрів нестационарної течії газу в проточній частині пневматичних ЕМК високого тиску. Напрямом даних досліджень є встановлення параметрів нестационарної течії в проточній частині клапанів та їх впливу на характеристики ЕМК високого тиску.

Метою досліджень є побудова теоретичної моделі нестационарної течії газу в проточній частині клапана та визначення основних параметрів нестационарної течії газу при відкритті клапана.

Конструктивні особливості проточної частини клапанів високого тиску

Функціональні характеристики пневматичних електромагнітних клапанів значною мірою залежать від робочих процесів, що супроводжують течію газу.

Протягом відкриття клапана має місце нестационарний рух газу по каналу між сідлом клапана і його запірною частиною. Розміри проточної частини щілини достатньо малі, а енергія потоку газу є великою. Тому мають місце інтенсивні процеси, обумовлені особливостями газодинаміки течії. Для визначення характеристик газодинамічних процесів необхідно встановити реальні геометричні та інші конструктивні параметри проточної частини клапанів.

Типова конструкція клапана (рисунок 1) містить сідло 1 та золотник 2 з гумовим кільцем 3.

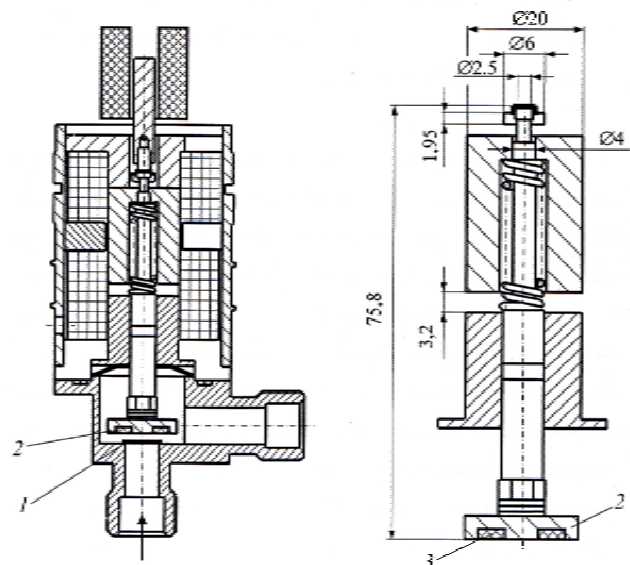
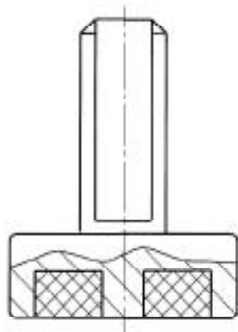


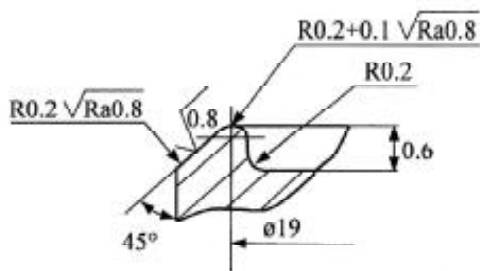
Рисунок 1 — Типова конструкція клапана із гумовим ущільненням

Гумове ущільнення 2 вмонтовано в сідло 1. Золотник клапана 3 зміщується за допомогою електромагнітного привода. Максимальне зміщення складає $\delta_0 = 0,3-0,6$ мм. При переміщенні золотника відносно сідла газ витікає через кільцеву щілину в напрямку, показаному стрілкою.

Проточну частину клапана високого тиску утворено тороподібною поверхнею сідла та плоскою поверхнею гумового кільця (рисунок 2)



а



б

Рисунок 2 — Конструктивні схеми деталей проточної частини клапана високого тиску: а – золотник з гумовою вставкою; б – форма робочої поверхні сідла

Деталі клапана, які утворюють проточну частину, мають високу якість поверхні.

Радіус тороподібного виступу складає $R0.2+0.1$ мм (рисунок 2, б). При цьому тороподібний виступ спряжено із циліндричною поверхнею та конічною поверхнею з кутом конуса 45° . Таким чином, загальний кут запірної поверхні складає 45° , і вона орієнтована до плоскої поверхні сідла під середнім кутом нахилу до нормалі $22,5^\circ$.

У процесі спрацювання електромагнітних клапанів на ущільнюючі елементи затворів впливає потік герметизуемого середовища у широкому діапазоні швидкостей, температур та градієнта тиску. В результаті дії потоку середовища відбувається ерозійне руйнування ущільнюючих поверхонь деталей затвору.

Функціонування виробів пневмогідроарматури, як правило, супроводжується динамічними ефектами різного походження. Вони можуть бути пов'язані з пуском та зупинкою різних елементів системи гідропневмопривода, зовнішніми механічними впливами, аварійними режимами тощо.

Оброблена гумова поверхня гумової вставки (рисунок 2, а) має високу якість. Її поверхня дещо виступає над металевим торцем клапана (рисунок 3, а).



а



б



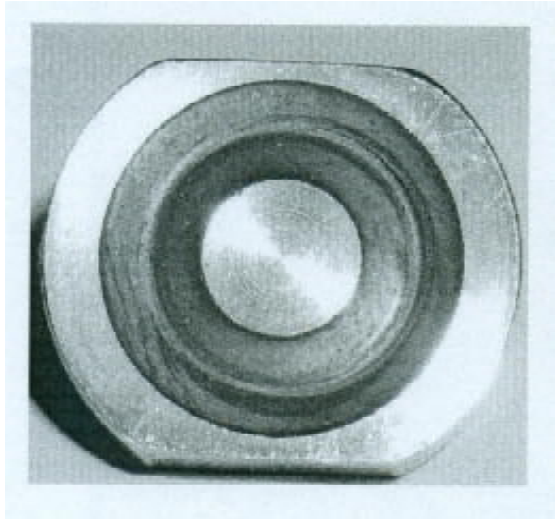
в

Рисунок 3 — Зовнішній вигляд плоскої обробленої гумової поверхні золотника: а – загальний вигляд клапана; б – збільшене (у 70 разів) фото гумової поверхні із концентричними рисками, що є наслідком токарної обробки; в – дефекти на гумовій поверхні (збільшено у 70 разів)

На обробленій гумовій поверхні спостерігаються риси і концентричні канавки, які є наслідком токарної обробки (рисунок 3, б). Аналіз вимірів на

мікроскопі показує, що на гумовій поверхні наявні концентричні виступи і впадини розташовані з кроком $\Delta h = 0,01$ мм глибиною 0,003–0,008 мм. На гумовій поверхні іноді мають місце дефекти у вигляді невеликих раковин (рисунок 3, в) та включень твердих частинок. Розміри раковин та включень становлять 0,005–0,015 мм.

При взаємодії гумової поверхні із сідлом клапана на гумовій поверхні утворюється кільцева заглибина (рисунок 4).



а



б

Рисунок 4 — Заглибина на гумовій поверхні, яка утворилася за період, відповідний 90% часу роботи клапана: а – загальний вигляд золотника із заглибиною; б – збільшено в 70 раз фото краю заглибини

На початку роботи клапана канавка має невеликі розміри. Її ширина складає 0,05–0,1 мм, а глибина 0,005–0,01 мм. В процесі динамічної дії золотника на сідло канавка збільшується. Вона має кільцеву форму із краєм, піднятим над поверхнею. На краю канавки утворюються виступи. Поверхня виступів і канавки є гладкою. На ній простежуються концентричні риски (рисунок 4).

Форма поверхні канавки впливає на процеси течії газу при спрацюванні клапана. Проведено виміри

форми канавки в радіальних перетинах золотника. При вимірах використано спеціальний скануючий профілограф, який забезпечує виміри ординат профілю канавки у радіальному перетині.

У результаті вимірів одержані точкові значення ординат поверхні канавки (таблиця 1).

Таблиця 1 — Виміряні значення ординат профілю канавки на гумовій поверхні

x	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0
y	-0,05	-0,07	-0,2	-0,1	0,28	0,48
x	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
y	0,31	-0,15	-0,15	-0,11	-0,05	-0,03

Отримані експериментальні дані є основою для встановлення аналітичної залежності, яка описує форму гумової поверхні у процесі експлуатації. Запропоновано залежність для опису ординат профілю канавки у вигляді добутку кривої Гауса на косинусоїдальну функцію:

$$y(x) = a_m e^{-\alpha x^2} \cos(\tau x), \quad (1)$$

де параметри a_m , α , τ одержані згідно метода найменших квадратів за умови найкращого наближення математичної моделі до експериментальних даних. Числові значення параметрів складають: $a_m = 1,1$ мм, $\alpha = 2$ мм⁻¹, $\tau = 4$ мм⁻¹.

Залежність (1) достатньо точно описує форму канавки на її основній ділянці (рисунок 6).

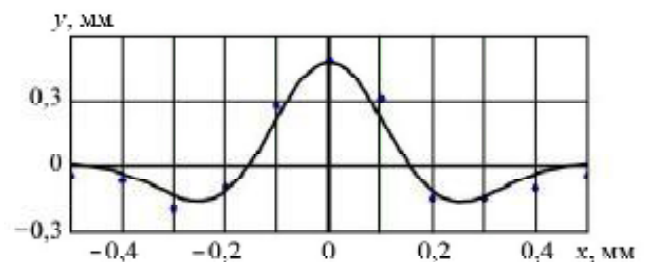


Рисунок 5 — Визначена експериментально форма канавки в радіальному перетині гумової поверхні (точки) та розрахунок за формулою 1 (суцільна крива)

Коли клапан знаходиться у закритому стані, золотник вдавнено у сідло, і форма гумової поверхні повторює форму його робочої частини. При цьому має місце деформація гумової поверхні через сили, що діють на золотник: сила стиску пружини та протилежна їй сила тиску газу на робочу ділянку золотника. Деформований стан у контакті характеризується величиною вдавлювання сідла у гумову поверхню (рисунок 6)

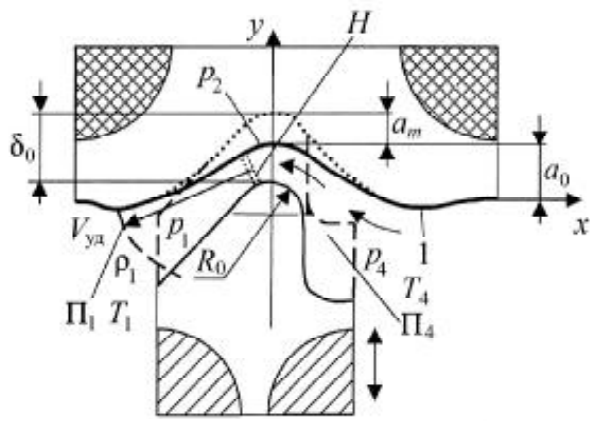


Рисунок 6 — Зміна форми проточної частини клапана при його спрацюванні

Клапан має високу швидкодію. Переміщення золотника відбувається у проміжок часу $t_0 = 0,01-0,15$ с. Закон переміщення відповідає аперіодичному процесу з невеликою коливальністю (рисунок 7).

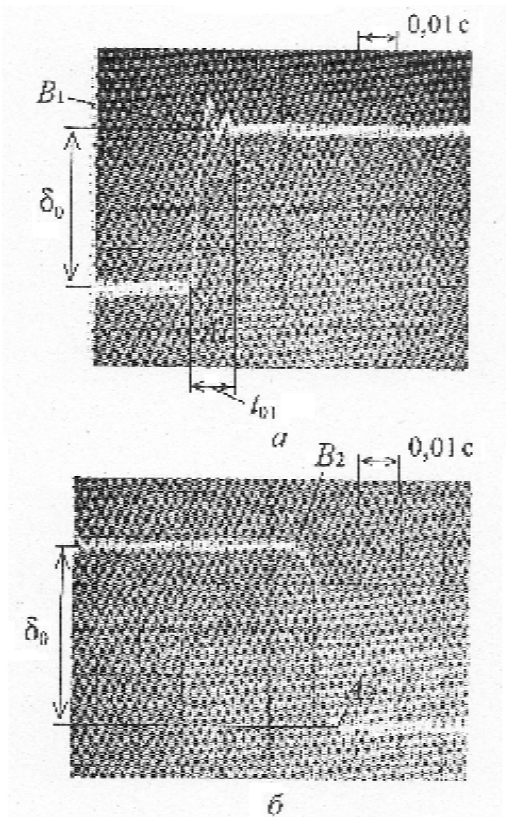


Рисунок 7— Експериментально визначене переміщення золотника клапана при його відкритті (а) та закритті (б)

У результаті аналізу характеру переміщення клапана на ділянці перехідного процесу можна зробити висновок про високу швидкодію електромагнітного привода. Робоче переміщення золотника спос-

терігується у проміжок часу $t_{AB} = 0,01-0,02$ с. При цьому перебіг газу під високим тиском відбувається у зазорі між поверхнею сідла і гумовою поверхнею золотника. Проаналізовано зміни площі поперечної перетину проточної частини клапана між вхідним перетином Π_4 і вихідним перетином Π_1 (рисунок 6). На основі формули (1) та геометрії тороподібного впливу сідла встановлено, що зміни площі перетину по довжині є незначними. У першому наближенні можна прийняти постійною по довжині площу перетину проточної частини.

Враховуючи незначний час переміщення золотника, для розрахунку параметрів течії у зазорі між сідлом і золотником використано теорію ударної хвилі [7]. При миттєвому відкриванні клапана у проточній частині виникає ударна хвиля H , через яку відбувається рух газу із швидкістю

$$V_2 = \frac{2}{k+1} \left(M_1 - \frac{1}{M_1} \right) a_1, \quad (2)$$

де a_1 — швидкість звуку в газі на виході клапана тиску, k — показник адіабати, M_1 — параметр (число Маха), який характеризує надзвуковий перебіг газу в проточній частині клапана.

Параметр M_1 пов'язаний з перепадом тиску на клапані наступним співвідношенням

$$\frac{p_4}{p_1} = \left(\frac{2k}{k+1} M_1^2 - \frac{k-1}{k+1} \right) \times \left[1 - \frac{(k-1)}{k+1} \left(M_1 - \frac{1}{M_1} \right) \right]^{\frac{2k}{k-1}}. \quad (3)$$

За формулою (3) виконано розрахунки параметрів течії у проточній частині клапана для тиску на виході клапана p_1 , що дорівнює атмосферному. У результаті встановлено залежність параметра M_1 від тиску p_4 на вході до клапана (рисунок 8).

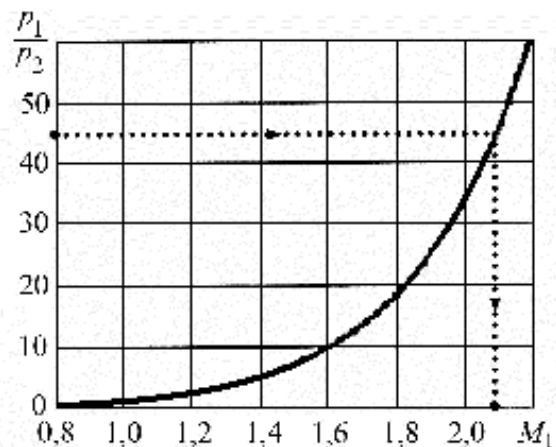


Рисунок 8 — Взаємозв'язок числа M_1 та відносного тиску на вході до клапана

Параметр M_1 визначає швидкість переміщення ударної хвилі у проточній частині клапана. Швидкість ударної хвилі перевищує швидкість звуку в газі і визначається залежністю

$$V_{уд} = M_1 a_1.$$

Для нормальних умов роботи клапана швидкість звуку складає $a_1 = 340$ м/с. Відповідно швидкість ударної хвилі для клапана високого тиску дорівнюватиме 714 м/с ($p_n = 4,5$ МПа, $M_1 = 2,1$).

Для визначеного параметра M_1 за формулою (2) знаходимо швидкість руху газу за ударною хвилею (рисунк 9).

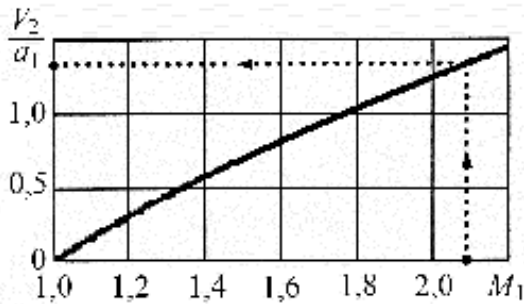


Рисунок 9 — Залежність відносної швидкості газу за ударною хвилею від параметра

Для клапана з номінальним тиском $p_n = 4,5$ МПа швидкість руху газу за ударною хвилею $V_2 = 1,35 a_1$ і складає близько 460 м/с.

За величиною параметра M_1 визначаємо число Маха газу за ударною хвилею

$$M_2 = \sqrt{\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}{k M_1^2 - \frac{k-1}{2}}}. \quad (4)$$

Число Маха газу за ударною хвилею M_2 змінюється при зміні тиску на вході до клапана p_n і параметра M_1 (рисунк 10).

Із наведеної залежності очевидна суттєва різниця значень M_1 і M_2 . Для клапана з номінальним тиском 4,5 МПа відношення параметрів складає близько 4-х.

При проходженні ударної хвилі змінюється густина газу. Відношення густини газу до і після ударної хвилі визначається залежністю

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\frac{k+1}{2} M_1^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}, \quad (5)$$

де ρ_2 – густина газу перед ударною хвилею, ρ_1 – густина газу на виході клапана.

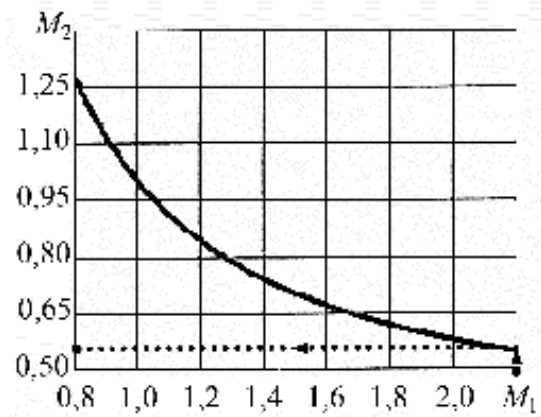


Рисунок 10 — Залежність числа Маха M_2 газу за ударною хвилею від параметра M_1

Із збільшенням параметра M_1 відношення густин зростає. Розрахунок за формулою (5) встановлює залежність, близьку до лінійної (рисунк 11).

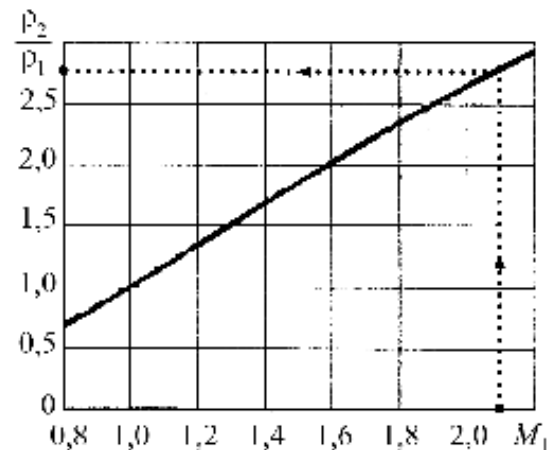


Рисунок 11 — Залежність відношення густини газу до і після ударної хвилі від параметра M_1

Для клапана з номінальним тиском $p_n = 4,5$ МПа густина газу змінюється у 2,75 разів.

Відносна зміна густини розраховується за формулою

$$\frac{\Delta p}{\rho_1} = \frac{M_1^2 - 1}{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}. \quad (6)$$

Відносна густина рівномірно зростає з ростом параметра M_1 (рисунк 12).

Для клапана з номінальним тиском $p_n = 4,5$ МПа відносна густина газу збільшується приблизно у 2 рази.

При проходженні ударної хвилі відбувається приріст тиску відносно тиску на виході клапана. Відносний приріст тиску за ударною хвилею розраховується за формулою

$$\frac{\Delta p}{p_1} = \frac{2k}{k+1} (M_1^2 - 1). \quad (7)$$

У результаті розрахунку встановлено, що приріст тиску збільшується з ростом параметра M_1 (рисунок 13).

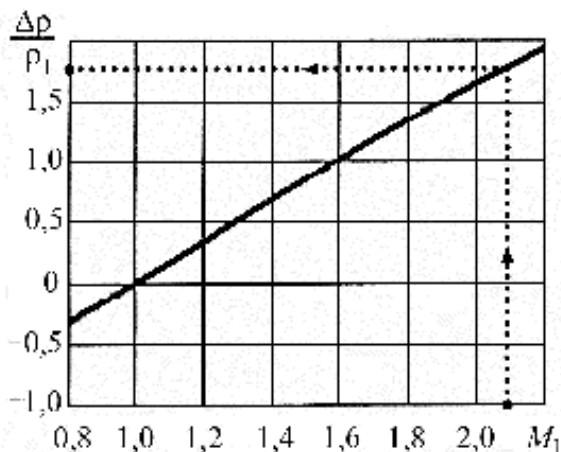


Рисунок 12 — Залежність густини газу за ударною хвилею від параметра M_1

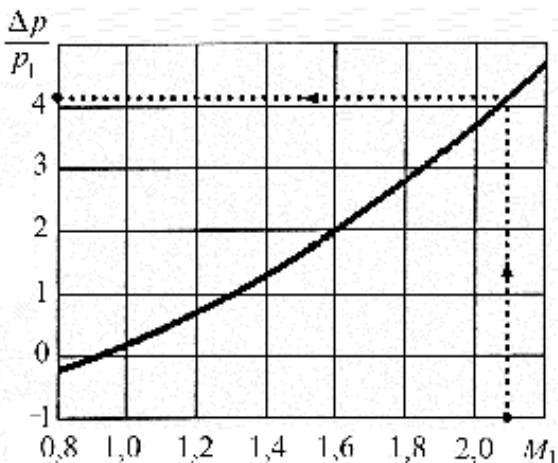


Рисунок 13 — Відносний приріст тиску в області ударної хвилі

При проходженні ударної хвилі має місце локальне підвищення температури газу. Воно розраховується за формулою

$$\frac{\Delta T}{T_1} = \frac{2(k-1)}{(k+1)^2 M_1^2} (M_1^2 - 1) (1 + kM_1^2). \quad (8)$$

Підвищення температури зростає з ростом параметра M_1 (рисунок 14).

За початкової температури газу 273°K підвищення температури для клапана високого тиску $p_n = 4,5 \text{ МПа}$ складає ΔT . При цьому абсолютна температура газу сягає 527°K .

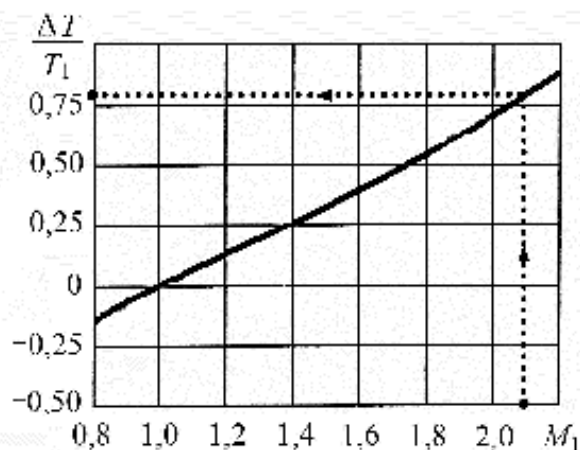


Рисунок 14 — Відносний приріст температури газу в області ударної хвилі

По результатах досліджень встановлено, що при відкриванні клапана його проточною частиною проходить ударна хвиля, яка суттєво змінює параметри газу. Відбувається значне підвищення температури газу. Воно поєднується із ростом густини та підвищеним тиском. Параметри газу змінюються надзвичайно швидко. Орієнтовний час проходження ударної хвилі складає величину порядку 10^{-5} с .

Короткочасна зміна параметрів газу мало впливає на робочі поверхні, зокрема, гумову поверхню золотника. Вплив проявляється лише у динамічній дії параметра, яка призводить до різкого підвищення навантаження на деталі клапана. При значній кількості спрацювань клапана сумарна імпульсна дія газового потоку може суттєво впливати на технічний стан золотника. Результатом дії динамічних навантажень є руйнування золотника або деструкція його поверхні.

Висновки

1. Для розрахунку номінальних параметрів течії (густини, швидкості, тиску та температури) в проточній частині клапанів високого тиску доцільно застосувати залежності, які описують одномірний нестационарний рух ідеального газу.

2. При відкриванні клапана в його проточній частині проходить ударна хвиля, швидкість якої сягає 700 м/с для клапана з номінальним тиском $4,5 \text{ МПа}$.

3. Густина газу за ударною хвилею перевищує густину газу при атмосферних умовах у 2 рази, а тиск підвищується в 4 рази.

4. Підвищення температури газу на фронті ударної хвилі може досягати значень 500°K .

5. Як напрям подальших досліджень рекомендується враховувати вихроутворення у проточній частині клапана високого тиску та визначати умови відриву потоку від стінок каналу з еластичними поверхнями.

Література

1. Кармугин, Б.В. Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры / Б.В. Кармугин, В.Л. Кисель, А.Г. Лазебник; Под общ. ред. Б.В. Кармугин. — К.: Техніка, 1980. — 295 с.
2. Гідрогазотермодинаміка: навч. посіб. / [Бадах В.М., Глазков М.М., Головка Ю.С. та ін.]; за ред. Г.Й. Зайончковського. — К.: НАУ-друк, 2009. — 352 с.
3. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев; В.Б. Овандер и др. — М.: Машиностроение, 1986. — 464 с.
4. Рыкунич, Ю.Н. Эксплуатационные изменения функциональных свойств электромагнитных клапанов, обусловленные циклическим срабатыванием электромагнитного привода / Ю.Н. Рыкунич, А.Е. Ситников, Я.Б. Федоричко, Е.Н. Барилюк, Г.Й. Зайончковский // Промислова гідравліка і пневматика. — 2010.—№4(30). — С. 53—57.
5. Ніколенко, І.В. Технічна механіка рідини і газу, гідравлічні та аеродинамічні машини: навч. посіб. / І.В. Ніколенко, О.Ф. Дашенко, Є.О. Красовський та ін. — Сімферополь: НАПКС, 2010. — 362 с.
6. Повх, И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. — Л.: Машиностроение, 1969. — 524 с.
7. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1973. — 847 с.

Надійшла 15.11.2012 року