

УДК 532.525.6

Гічов Ю.О. — д.т.н., проф., Національна металургійна академія України (НМетАУ)

Попова А.С. — студент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ)

Васільків Т.А. — аспірант, ДНУЗТ

Перцевий В.О. — к.т.н., доцент, ДНУЗТ

Мацукевич М.Ю. — студент, НМетАУ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВОРОТНОГО АКУСТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ В ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПРОЦЕСАХ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Наведено загальну характеристику явища зворотного акустичного зв'язку у трансзвукових газових струминах та обґрунтування актуальності його дослідження. Наведено методiku та результати експериментального дослідження дисипації енергії газової струмини, пов'язаної з впливом на неї зворотного акустичного зв'язку. Результати експериментальних досліджень можуть бути використані при розробці режимів експлуатації, а також газодинамічних та конструктивних параметрів пристроїв, що використовують транс звукові газові струмини в процесах металургійного виробництва.

Ключові слова: газодинаміка; звукова струмина; надзвукова струмина; зворотний акустичний зв'язок.

Вступ

Звукові та надзвукові газові струмини застосовуються в технологічних та теплотехнічних процесах різних галузей промисловості, зокрема в металургії.

Газодинамічні характеристики таких струмин мають значний вплив на інтенсивність тепло- та масообмінних процесів конвертерного та мартенівського способу виробництва сталі, позапічного доведення сталі, диспергування розплаву металу з метою його рафінування тощо.

В свою чергу, керування газодинамічними характеристиками звукових та надзвукових струмин дозволяє створювати ефективні режими перебігу технологічних та теплотехнічних процесів.

Газодинамічні та акустичні характеристики газових струмин тісно пов'язані між собою. Насамперед це стосується звукових та надзвукових газових струмин.

Відомо, що при витіканні з сопла, звукові та надзвукові газові струмини генерують звукове випромінювання, яке здатне змінювати структуру, газодинамічні характеристики та, власне, саме звукове випромінювання струмини [1 – 3].

Акустичному випромінюванню звукових та надзвукових газових струмин притаманні наступні особливості:

- інтенсивність акустичного випромінювання такими струминами розподіляється за частотою нерівномірно;
- на певних (характеристичних) частотах інтенсивність випромінювання значно підвищується (такі частоти мають назву дискретної складової або дискретного тону).

Власне, ефект зворотного акустичного зв'язку (ЗАЗ) може розглядатись як вплив власного акустичного випромінювання струмини дискретної частоти на структуру газодинамічної (початкової) ділянки струмини, тобто на стрибки ущільнення [4].

Інтенсивне випромінювання звуку дискретної частоти спричиняється коливальними процесами, які мають місце в стрибках ущільнення, а сам ЗАЗ зумовлений відбиванням акустичного випромінювання струмини від перешкод, в якості яких можуть виступати кромка отвору сопла, а також інші вузли та деталі теплотехнічних та технологічних агрегатів. Акустичні хвилі ЗАЗ повертаються до струмини, оскільки спрямовані проти напрямку її течії, та дістаються вихідного отвору сопла.

Таким чином, нехтування впливу власного акустичного випромінювання на структуру струмини може призводити до значних похибок при розрахунку її газодинамічних характеристик.

Шляхом збільшення, зменшення або усунення ефекту ЗАЗ можна отримати струмину з певними, а головне, прогнозованими газодинамічними характеристиками, що, в свою чергу, впливає на течію на дозвуковому відрізку струмини, де, переважно, відбуваються процеси змішування струмини з оточуючим середовищем.

Формулювання задачі

Аналіз літературних джерел засвідчив існування низки експериментальних та теоретичних досліджень що стосуються впливу ЗАЗ на звукові та надзвукові газові струмини. Проте, здебільшого, ці дослідження стосуються вивчення впливу окремого чинника на газодинамічні характеристики струмини. Так, робота [5] присвячена, переважно, дослідженню спектрів акустичного випромінювання струмини, в роботі [6] наведено дослідження впливу неізотермічності струмини на її газодинамічні характеристики, в роботах [7, 8] розглянуто вплив товщини кромки сопла на акустичні та газодинамічні характеристики

струмини тощо. Слід зазначити, що основною перевагою звукових та надзвукових газових струмин у порівнянні з дозвуковими струминами є наявність стрибків ущільнення. Втрати тиску, тобто, енергії в струміні на ділянці течії зі стрибками ущільнення при помірних значеннях міри нерозрахованості струмини майже відсутні [9]. Таким чином, за допомогою звукових та надзвукових струмин енергія струмини кисню може без втрат надходити, наприклад, до розплаву металу в конвертері. ЗАЗ призводить до руйнування стрибків ущільнення (бочкоподібної структури) струмини, наслідком чого є дисипація енергії струмини в оточуюче середовище та, відповідно, зниження швидкості та тиску в струміні, що потребує підвищення тиску газу перед соплом, а, відповідно, потребує збільшення витрат на стискання газу.

Оскільки відомі з літературних джерел результати експериментальних досліджень не задовольняють вирішенню даної технічної задачі, яка полягає у визначенні дисипації енергії звукової та надзвукової струмини через вплив на неї ЗАЗ при взаємодії струмини з поверхнею розплаву металу, наприклад при продувці конвертера або мартенівської ванни, проведено власне експериментальне дослідження.

Методика дослідження

Стиснене повітря від компресора надходило до сопла. Тиск газу перед соплом контролювався за допомогою деформаційного зразкового манометра.

Імітація робочого простору теплотехнічного або теплотехнологічного агрегату виконана за допомогою циліндричної ємності, яка представлена на рисунку 1. Отвори 1 та 2 для вимірювання надлишкового тиску діаметром 0,8 мм виконані по нормалі до торця циліндричної ємності. В отвори 1 та 2 встановлювалися мідні трубки повного тиску. Гумові трубки діаметром 2 мм від отворів 1 та 2 підведені до двох важільних сильфонних манометрів. Гранична похибка вимірювання манометрів становить 0,5 % від максимального тиску, що вимірюється.

Сутність експерименту полягала у вимірюванні тиску в отворах 1 та 2 на торець циліндричної ємності, який імітував, наприклад, поверхню розплаву металу в конвертері, при взаємодії з ним звукової або надзвукової газової струмини.

Експеримент охоплював наступні значення газодинамічних та геометричних параметрів струмини та циліндричної ємності:

- діаметр вихідного отвору сопла $d_0 = 0,012; 0,016; 0,020; 0,022; 0,024; 0,027$ м;
- діаметр циліндричної ємності $D = 0,04; 0,05; 0,06; 0,08$ м;

- висота циліндричної ємності $H = 0,12; 0,15; 0,18; 0,24$ м;
- отвори вздовж торця циліндричної ємності розташовані з кроком $s = 0,013; 0,017; 0,020; 0,027$ м;
- відносний діаметр циліндричної ємності $\bar{d} = d_0/D = 0,20; 0,24; 0,25; 0,30; 0,32; 0,33; 0,44$;
- кут між віссю сопла та віссю циліндричної ємності $\varphi = 0^\circ$;
- площа вихідного отвору сопла суміщалась з площиною вхідного отвору циліндричної ємності (максимальне наближення до імітації продування розплаву металу киснем в конвертері);
- абсолютний тиск повітря перед соплом (після стискання в компресорі) $P_{c0} = 0,24 \div 2,12$ МПа;
- число Маха у вихідному отворі сопла $M_0 = 1,0$.

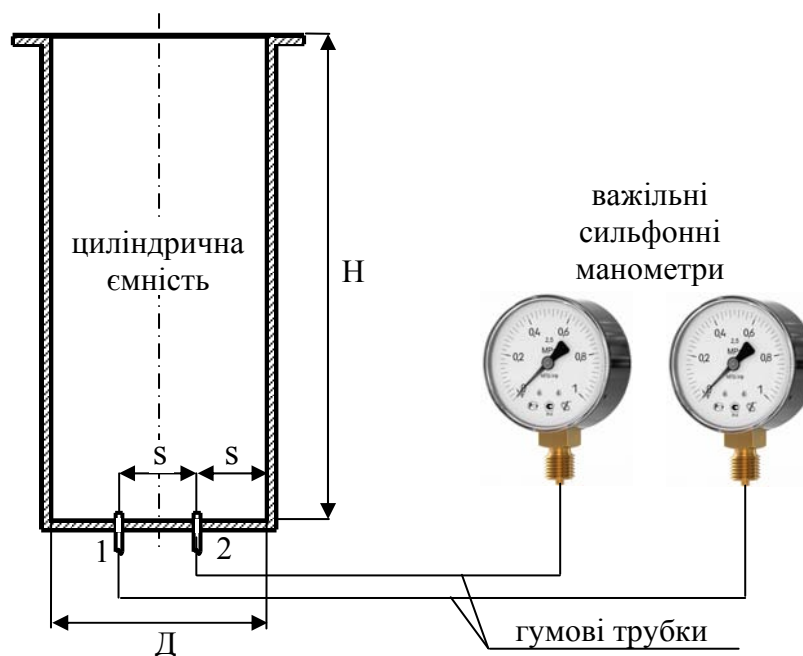


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки для дослідження впливу ЗАЗ на газодинамічні характеристики звукової струмини:

1 та 2- отвори для вимірювання надлишкового тиску;
 s - крок отворів вздовж торця циліндричної ємності;
 H - висота циліндричної ємності;
 D - діаметр циліндричної ємності

Імітація розплаву металу в конвертері за допомогою торця циліндричної ємності є цілком прийнятною, оскільки коефіцієнти відбивання звукової хвилі, що генеруються струминою, від поверхні розплаву металу в конвертері та від поверхні торця циліндричної ємності

відрізняються не більше, як на 1,0%.

Так, коефіцієнт відбивання звукової хвилі від поверхні розплаву металу та торця циліндричної ємності дорівнює [10]:

$$R = \left(\frac{1 - \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2}}{1 + \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2}} \right)^2 \quad (1)$$

де ρ_1 – густина середовища (повітря) з якого переходить звукова хвиля, кг/м^3 ; ρ_2 – густина середовища (розплав металу або сталь, з якої виготовлено циліндричну ємність) в яке переходить звукова хвиля, кг/м^3 ; c_1 та c_2 – швидкість розповсюдження звуку в повітрі та в розплаві металу (в матеріалі торця циліндричної ємності) відповідно, м/с .

Оскільки густина ρ_2 розплаву металу або сталі, з якої виготовлено циліндричну ємність відрізняються на 3,2 % [11], а швидкості розповсюдження звуку в розплаві металу та в матеріалі торця циліндричної ємності відрізняються на 20,5 %, коефіцієнти відбивання звукової хвилі від поверхні розплаву металу в конвертері та від поверхні торця циліндричної ємності згідно з формулою (1) відрізнятимуться менш ніж на 0,1 %, що є цілком прийнятним при фізичному моделюванні.

В якості прикладу в таблиці 1 наведено результати експериментального дослідження, а саме середньоарифметичне значення відносного тиску повітря $\bar{P}_{\text{абс т}}$ в отворах 1 та 2, при різних значеннях тиску повітря перед соплом $\bar{P}_{\text{с0}}$ та різних значеннях відносного діаметра циліндричної ємності $\bar{d}$.

Таблиця 1

Вибірка результатів експериментального дослідження

$\bar{d} = 0,44$		$\bar{d} = 0,32$		$\bar{d} = 0,24$	
$\bar{P}_{\text{с0}}$	$\bar{P}_{\text{абс т}}$	$\bar{P}_{\text{с0}}$	$\bar{P}_{\text{абс т}}$	$\bar{P}_{\text{с0}}$	$\bar{P}_{\text{абс т}}$
3,53	2,08	5,96	2,21	8,44	2,11
3,90	2,34	6,93	2,63	10,95	2,61
4,42	2,56	8,50	3,04	13,48	3,01
5,21	3,00	9,84	3,41	15,93	3,62
5,95	3,36	10,97	3,73	18,44	4,04

Симплекси, які характеризують відносний тиск повітря на топець циліндричної ємності та відносний тиск повітря перед соплом в таблиці 1, визначаються за формулами:

$$\bar{P}_{\text{абс т}} = \frac{P_{\text{атм}} + P_{\text{абс т}}}{P_{\text{атм}}} \quad (2)$$

$$\bar{P}_{\text{с0}} = \frac{P_{\text{атм}} + P_{\text{с0}}}{P_{\text{атм}}} \quad (3)$$

де $P_{\text{атм}}$ - атмосферний тиск, Па.

На рисунку 2 та рисунку 3 наведено залежність втрат тиску (енергії) звукової струмینی від відносного тиску повітря перед соплом ($\bar{P}_{\text{с0}}$) та відносного діаметра циліндричної ємності ($\bar{d}$). Графіки, які наведено на рисунку 2 та рисунку 3 побудовано за результатами експериментальних досліджень, приклад яких наведено в таблиці 1.

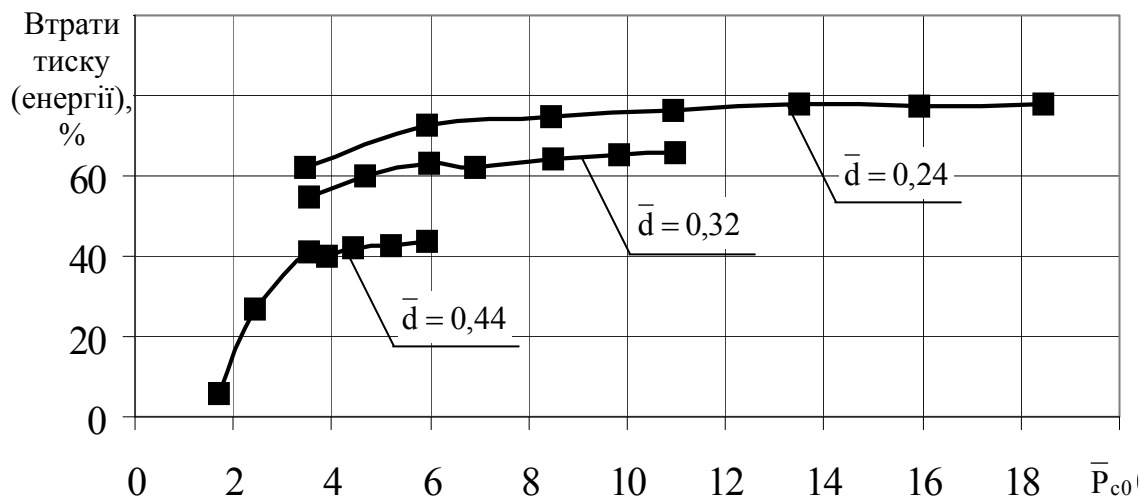


Рис. 2. Залежність втрат тиску (енергії) звукової струмینی від відносного тиску повітря перед соплом ($\bar{P}_{\text{с0}}$) та відносного діаметра циліндричної ємності ($\bar{d}$)

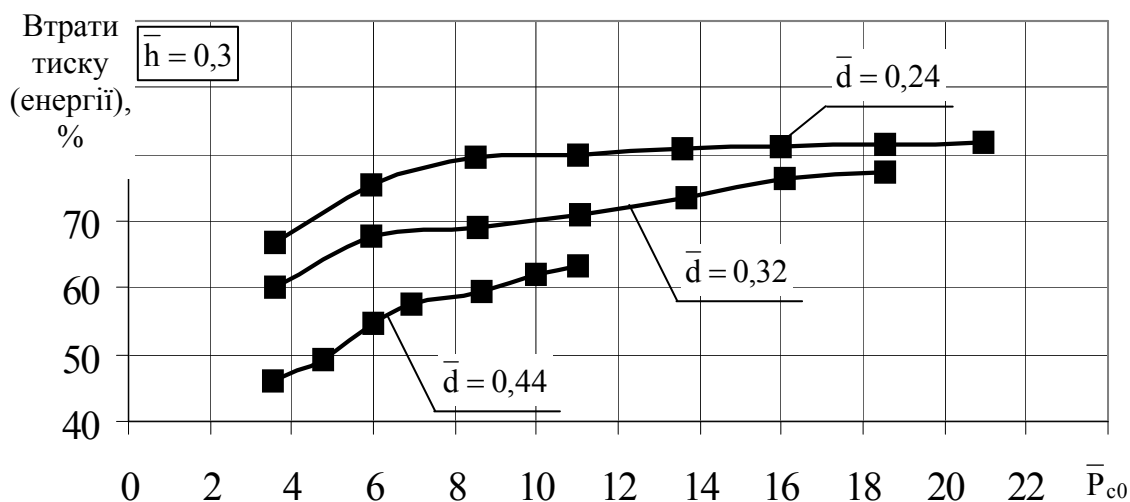


Рис. 3. Залежність втрат тиску (енергії) звукової струмینی від відносного тиску повітря перед соплом ($\bar{P}_{\text{с0}}$) та відносного діаметра циліндричної ємності ($\bar{d}$)

Аналіз рисунку 2 та рисунку 3 дозволяє зробити наступні висновки:

- при відносному тиску повітря перед соплом $\bar{P}_{c0} > 7,0$ втрати тиску (енергії) звукової струмینی майже не залежать від відносного тиску повітря перед соплом ($\bar{P}_{c0}$) для усіх значень відносного діаметра циліндричної ємності ($\bar{d}$);

- втрати тиску (енергії) звукової струмینی значно зменшуються при відносному тиску повітря перед соплом $\bar{P}_{c0} < 7,0$, що можна пояснити зменшенням довжини ділянки з бочкоподібною структурою струмینی, тобто ділянки струмینی зі стрибками ущільнення, оскільки довжина цієї ділянки зменшується зі зниженням тиску перед соплом. Це означає, що руйнівний вплив ЗАЗ на бочкоподібну структуру струмینی зменшується при зменшенні тиску газу перед соплом.

На рисунку 4 наведено залежність відносного тиску на торець циліндричної ємності ($\bar{P}_{абс\ t}$) від відносної відстані від площини зрізу сопла до площини вхідного отвору циліндричної ємності ($\bar{h}$).

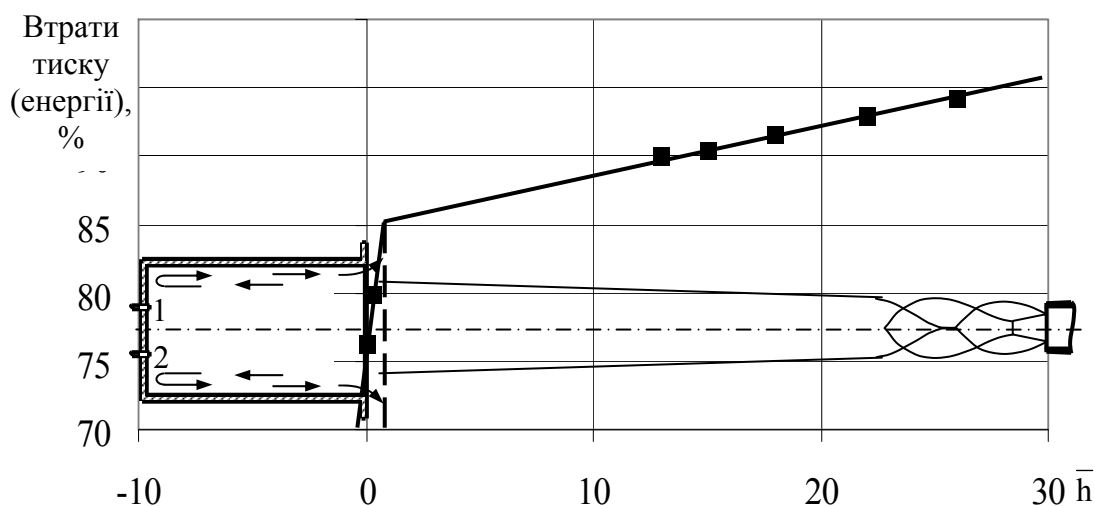


Рис. 4. Залежність втрат тиску (енергії) звукової струмینی від відносної відстані від площини зрізу сопла до площини вхідного отвору циліндричної ємності ($\bar{h}$):
1 та 2 – точки вимірювання повного тиску (тиску гальмування)

З огляду на рисунок 4 можна зробити наступні висновки:

- при однаковій довжині газодинамічної ділянки (бочкоподібною структури) струмینی зі зменшенням відстані від площини зрізу сопла до площини вхідного отвору циліндричної ємності ($\bar{h}$) втрати тиску (енергії) звукової струмینی зменшуються за лінійним законом, але нерівномірно;

- при $\bar{h} \approx 1,0$ відмічається зміна кута нахилу залежності втрат тиску (енергії) від відстані від площини зрізу сопла до площини вхідно-

го отвору циліндричної ємності; це означає, що ще до суміщення площини зрізу сопла з площиною вхідного отвору циліндричної ємності ($\bar{h} \approx 1,0$) характер зміни втрат енергії стає таким, як і при $\bar{h} \leq 0$, тобто таким, як і при суміщенні площини зрізу сопла з площиною вхідного отвору циліндричної ємності або при подальшому заглибленні сопла в порожнину циліндричної ємності; такий характер зміни газодинамічних характеристик струмینی можна пояснити тим, що газодинамічна ділянка струмینی, яка є генератором потужного дискретного тону звукового випромінювання, знаходиться в порожнині циліндричної ємності, тобто, вже всередині циліндричної ємності, тому відбивання звукової хвилі від кромки циліндричної ємності не відбувається і руйнування бочкоподібної структури газодинамічної ділянки струмینی зменшується, за рахунок чого довжина газодинамічної ділянки збільшується.

На рисунку 5 наведено залежність втрат тиску (енергії) звукової струмینی від відносного тиску повітря перед соплом ($\bar{P}_{c0}$) та відстані між площиною вихідного отвору сопла і площиною вхідного отвору циліндричної ємності ($\bar{h}$).

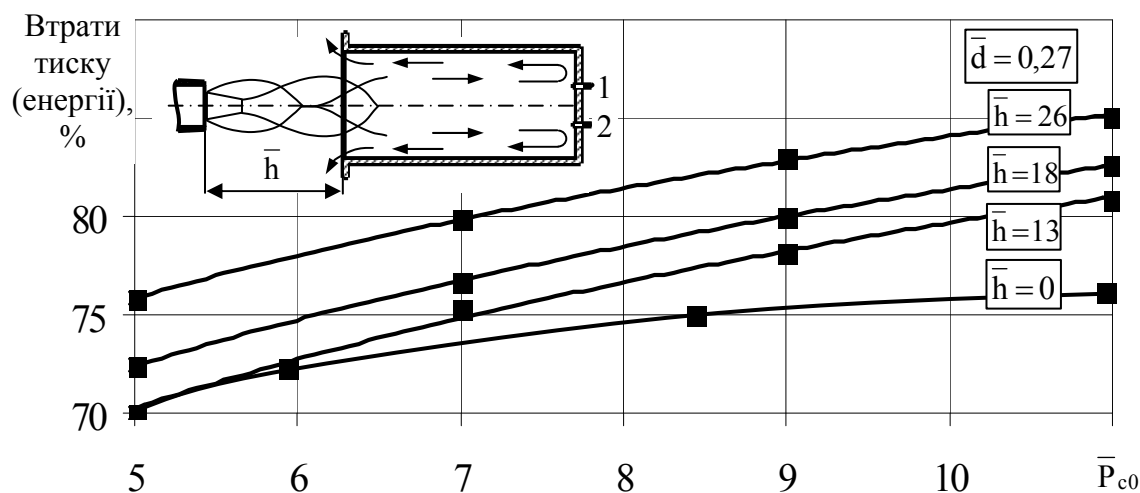


Рис. 5. Залежність втрат тиску (енергії) звукової струмینی від відносного тиску повітря перед соплом ($\bar{P}_{c0}$) та відстані між площиною вихідного отвору сопла і площиною вхідного отвору циліндричної ємності ($\bar{h}$):
1 та 2 – точки вимірювання повного тиску (тиску гальмування)

З рисунка 5 видно, що при збільшенні відносного тиску повітря перед соплом ($\bar{P}_{c0}$) та при суміщенні площини зрізу сопла з площиною вхідного отвору циліндричної ємності або при подальшому заглибленні сопла в порожнину циліндричної ємності, втрати тиску (енергії) струмینی майже не залежать від відносного тиску повітря перед соплом.

Висновки

Виконано фізичне моделювання процесу дисипації енергії звукової газової струмини за рахунок впливу на неї ЗАЗ.

Аналіз результатів експериментальних досліджень свідчить про те, що втрати тиску (енергії) звукової струмини значно зменшуються при відносному тиску повітря перед соплом $\bar{P}_{c0} < 7,0$.

Вид кривих (характер зміни) втрат тиску (енергії) майже не залежить від геометричних характеристик об'єктів, з якими взаємодіє звукова струмина газу, тобто від діаметра торця, а також наявності бокової поверхні у випадку взаємодії струмини з циліндричною ємністю.

Перелік використаних джерел

1. Powell A. On the noise emanating from a two-dimensional jet above the critical pressure [Text] / A. Powell // Aeronautical Quarterly. – 1953. – Vol. 4. – P. 103–122.
2. Powell A. On the mechanism of choked jet noise [Text] / A. Powell // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1953. – Vol. 66, № 12. – P. 1039–1056.
3. Powell A. A Survey of experiments on jet noise: a Study of the mechanism of noise production of jet engines, with brief notes on its reduction [Text] / A. Powell // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 1954. – Vol. 26, № 1. – P. 2–8.
4. Особенности аэроакустики сверхзвукового течения в технологических процессах [Текст] / П. А. Деливеров, Е. А. Капустин, В. П. Нещерет [и др.] // Гидродинамические проблемы технологических процессов. – М. : 1988. – С. 102–110.
5. Особенности аэроакустики сверхзвукового течения в технологических процессах [Текст] / П. А. Деливеров, Е. А. Капустин, В. П. Нещерет [и др.] // Гидродинамические проблемы технологических процессов. – М. : 1988. – С. 102–110.
6. Шлик О. Э. Влияние температуры окружающей среды на распространение сверхзвуковой струи с учетом эффекта обратной акустической связи [Текст] / О. Э. Шлик, П. А. Нещерет, А. В. Рябухин // Проблемы турбулентных течений. – М. : Наука, 1987. – С. 149–152.
7. Капустин Е. А. Особенности истечения перерасширенной струи из сопла с кромкой конечной толщины [Текст] / Е. А. Капустин, П. А. Нещерет, О. Э. Шлик // Аэродинамика в технологических процессах. – М. : 1981. – С. 59–62.
8. Нещерет П. А. К расчету течения в основном участке сверхзвуковой струи с учетом влияния торца сопла [Текст] / П. А. Нещерет, Е. А. Капустин, О. Э. Шлик // Журнал СО АН СССР. Серия Приклад-

ная механика и техническая физика. – 1984. – № 5. – С. 81–85.

9. Лухтура Ф. И. Одномерная теория сверхзвуковых нерасчетных струй газа [Текст] / Ф. И. Лухтура // Известия АН СССР. Серия Механика жидкости и газа. – 1993. – № 1. – С. 48–56.

10. Абрамов О. В. Ультразвуковая обработка материалов [Текст] / О. В. Абрамов, И. Г. Хорбенко, Ш. Швегла. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

11. Арсентьев П. П. Металлические расплавы и их свойства [Текст] / П. П. Арсентьев, Л. А. Коледов. – М. : Metallurgia, 1976. – 376 с.

Рукопис надійшов 14.09.2015 р.