

УДК 532.525.6

Ю. О. Гічов¹, А. С. Попова², Т. А. Васільків², В. О. Перцевий²

¹Національна металургійна академія України (м. Дніпропетровськ)

²Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
ім. академіка В. Лазаряна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ Й ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВОРОТНОГО АКУСТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ В ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Наведено загальну характеристику явища зворотного акустичного зв'язку у трансзвукових газових струминах та обґрунтування актуальності його дослідження. Запропоновано: результати експериментального вивчення дисипації енергії газової струмини, пов'язаної з впливом на неї зворотного акустичного зв'язку; критеріальну залежність втрат тиску трансзвукової газової струмини; результати математичного моделювання впливу зворотного акустичного зв'язку на структуру газової струмини. Виконано фізичне моделювання процесу дисипації енергії звукової газової струмини за рахунок впливу на неї зворотного акустичного зв'язку та аналіз результатів експериментальних досліджень. Узагальнено експериментальні дослідження дисипації енергії звукової газової струмини на основі теорії подібності. Запропоновано алгоритм, застосувавши який можна адаптувати формулу для розрахунку втрат енергії імпульсними струминами, зокрема струминами, які в результаті взаємодії з розплавом металу формують заглиблення (лунку) у розплаві металу, наприклад під час продувки конвертера або мартенівської ванни. За допомогою фізичного моделювання визначено діапазон значень тиску газу перед соплом, за яких відбувається руйнування зворотним акустичним зв'язком тільки однієї останньої комірки бочкоподібної структури початкової ділянки трансзвукової газової струмини.

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

Приведена общая характеристика явления обратной акустической связи в трансзвуковых газовых струях и обоснование актуальности ее исследования. Предложены: результаты экспериментального изучения диссипации энергии газовой струи вследствие влияния на нее обратной акустической связи; критерияльная зависимость потерь давления трансзвуковой газовой струи; результаты математического моделирования влияния обратной акустической связи на структуру газовой струи. Выполнено физическое моделирование процесса диссипации энергии звуковой газовой струи за счет влияния на нее обратной акустической связи и анализ результатов экспериментальных исследований. Обобщены экспериментальные исследования диссипации энергии звуковой газовой струи на основе теории подобия. Предложен алгоритм, применив который можно выполнить адаптацию формулы для расчета потерь энергии импульсными струями, в частности струями, которые при взаимодействии с расплавом металла формируют углубление (лунку) в расплаве металла, например при продувке конвертера или мартеновской ванны. С помощью физического моделирования определен диапазон значений давления газа перед соплом, при которых наблюдается разрушение обратной акустической связью только одной последней ячейки бочкообразной структуры начального участка трансзвуковой газовой струи.

Ключевые слова: газодинамика, звуковая струя, сверхзвуковая струя, обратная акустическая связь.

The general characteristic of the phenomenon of acoustic feedback in transonic gas jets and a substantiation of a urgency of its research are brought. The results of an experimental research of a dissipation of energy of a gas jet in connection to acoustic feedback influence are brought; criterial dependence of pressure losses of a transonic gas jet; results of mathematical modeling of influence of acoustic feedback on the structure of a gas jet. Physical modeling process of a dissipation of energy of a sound gas jet due to effect on it by acoustic feedback and the assaying of results of experimental researches is executed. Generalization of experimental researches of a dissipation of energy of a sound

gas jet on the basis of similarity theory is executed. The algorithm owing to which use it is possible to execute adaptation of the formula for calculation of an energy loss by the impact jets, in particular is offered by jets which at interacting with a melt of metal form a deepening cavity in a melt of metal, for example at blow of the vessel or the Martin bosh. By means of physical modeling the range of values of pressure of gas before nozzle at which destruction by acoustic feedback only one last cell of the barrel-like structure of an initial site of a transonic gas jet is certain.

Key words: gas dynamics, sound jet, supersonic jet, acoustic feedback.

Вступ. Звукові та надзвукові газові струмини широко застосовують у технологічних і теплотехнічних процесах металургійної галузі. Газодинамічні характеристики таких струмин мають значний вплив на інтенсивність тепло- та масообмінних процесів конвертерного й мартенівського способів виробництва сталі, позапічного доведення сталі, диспергування розплаву металу для його рафінування тощо.

Керування газодинамічними характеристиками звукових і надзвукових струмин дозволяє створювати ефективні режими перебігу технологічних і теплотехнічних процесів. Газодинамічні й акустичні характеристики газових струмин взаємопов'язані між собою. Нехтування впливу власного акустичного випромінювання на структуру струмини призводить до значних похибок під час розрахунку її газодинамічних характеристик.

У даній статті досліджено ефект зворотного акустичного зв'язку (ЗАЗ), який являє собою вплив власного акустичного випромінювання струмини певної (дискретної) частоти на структуру газодинамічної (початкової) ділянки струмини, тобто на стрибки ущільнення. Сягаючи вихідного отвору сопла, акустичні хвилі змінюють співвідношення тиску в струмині та в середовищі, в яке вона витікає, що спричиняє зміну кута нахилу межі струмини до її поздовжньої осі. Вплив ЗАЗ на стрибки ущільнення призводить до відхилення (розгойдування) стрибків ущільнення та зміни інтенсивності коливальних процесів у струмині [11].

Формулювання задачі. Аналіз літературних джерел засвідчив наявність низки експериментальних і теоретичних досліджень, що стосуються впливу ЗАЗ на звукові та надзвукові газові струмини. Проте здебільшого вони стосуються вивчення впливу окремого чинника на газодинамічні характеристики струмини. Так, працю [3] присвячено переважно вивченню спектрів акустичного випромінювання струмини, у [10] наведено дослідження впливу неізотермічності струмини на її газодинамічні характеристики, у публікації [5] розглянуто вплив товщини кромки сопла на акустичні та газодинамічні характеристики струмини тощо. Слід зазначити, що основною перевагою звукових і надзвукових газових струмин порівняно із дозвуковими є наявність стрибків ущільнення. Втрати тиску, тобто енергії в струмині на ділянці течії зі стрибками ущільнення за помірних значень міри нерозрахованості струмини майже відсутні [9]. Таким чином, за допомогою звукових і надзвукових струмин енергія струмини кисню може без втрат надходити, наприклад, до розплаву металу в конвертері. ЗАЗ призводить до руйнування стрибків ущільнення (бочкоподібної структури) струмини, що спричиняє дисипацію енергії струмини в оточуюче середовище та відповідно зниження швидкості й тиску в струмині, а це потребує підвищення тиску газу перед соплом, а отже, і збільшення витрат на стискання газу.

Оскільки результати експериментальних досліджень із відомих літературних джерел не можна застосувати для виконання даного технічного завдання, яке полягає у визначенні дисипації енергії звукової та надзвукової струмини через вплив на неї ЗАЗ під час взаємодії струмини з поверхнею розплаву металу,

наприклад у разі продувки конвертера або мартенівської ванни, проведено власне експериментальне дослідження, методику якого наведено у праці [2].

Результати експериментальних досліджень. Автори статті здійснили власні експериментальні дослідження (рис.1).

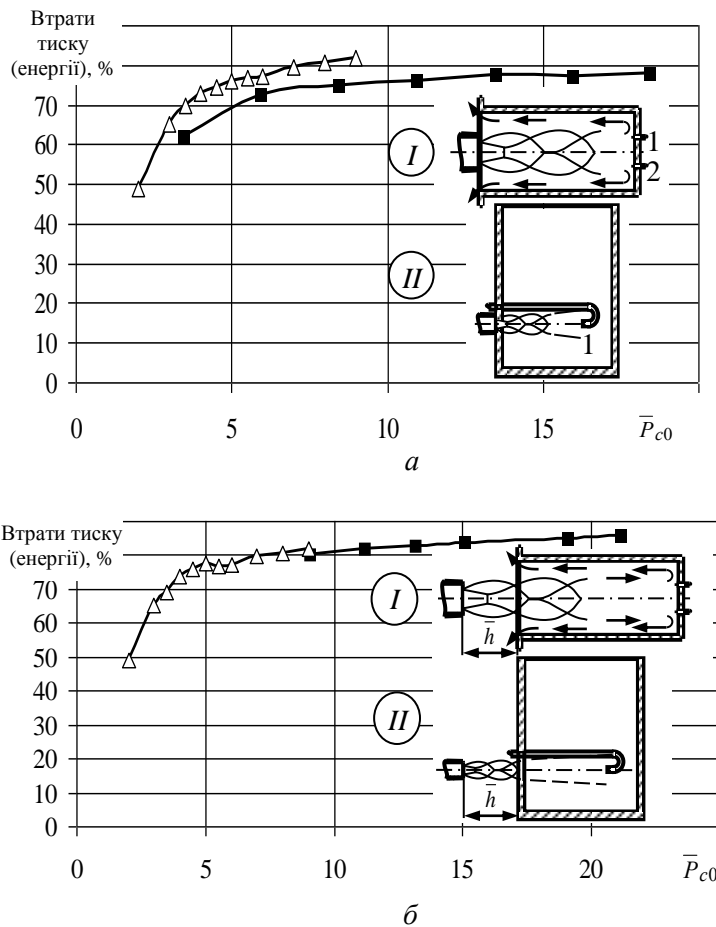


Рис. 1. Порівняння втрат тиску (енергії) звукової струмینی у випадку її взаємодії із циліндричною смістю та її витікання у вільний простір :

- ▲— — власні експериментальні дослідження за схемою I
- — експериментальні дослідження [7] за схемою II;
- I і 2 – точки вимірювання повного тиску (тиску гальмування);

a – для значень параметрів $\bar{h} = 0; \bar{d} = 0,24$; б – для значень параметрів $\bar{h} = 0,26; \bar{d} = 0,24$

На основі аналізу рис. 1 можна зазначити таке:

– у разі відносного тиску повітря перед соплом $\bar{P}_{c0} = \frac{P_{атм} + P_{c0}}{P_{атм}} > 7,0$ втрати

тиску (енергії) звукової струмینی майже не залежать від відносного тиску повітря перед соплом (\bar{P}_{c0}) у випадку розташування площини зрізу сопла поза площиною вхідного отвору циліндричної колби та відкритої посудини;

– вид кривих втрат тиску (енергії) майже не залежить від геометричних характеристик об'єктів, із якими взаємодіє звукова струмина газу, тобто від діаметра торця, а також наявності бокової поверхні у випадку взаємодії струмینی з

циліндричною колбою та напірною трубкою у випадку витікання струмینی у відкриту посудину;

– на втрати тиску (енергії) впливає розташування кромки вхідного отвору циліндричної колби відносно площини зрізу сопла та кромки отвору у відкритій порожнині, таким чином, можна зробити висновок про те, що ЗАЗ з’являється в результаті відбивання власного акустичного випромінювання струмینی дискретної частоти саме від згаданих вище кромek вхідного отвору циліндричної колби та кромки отвору у відкритій порожнині.

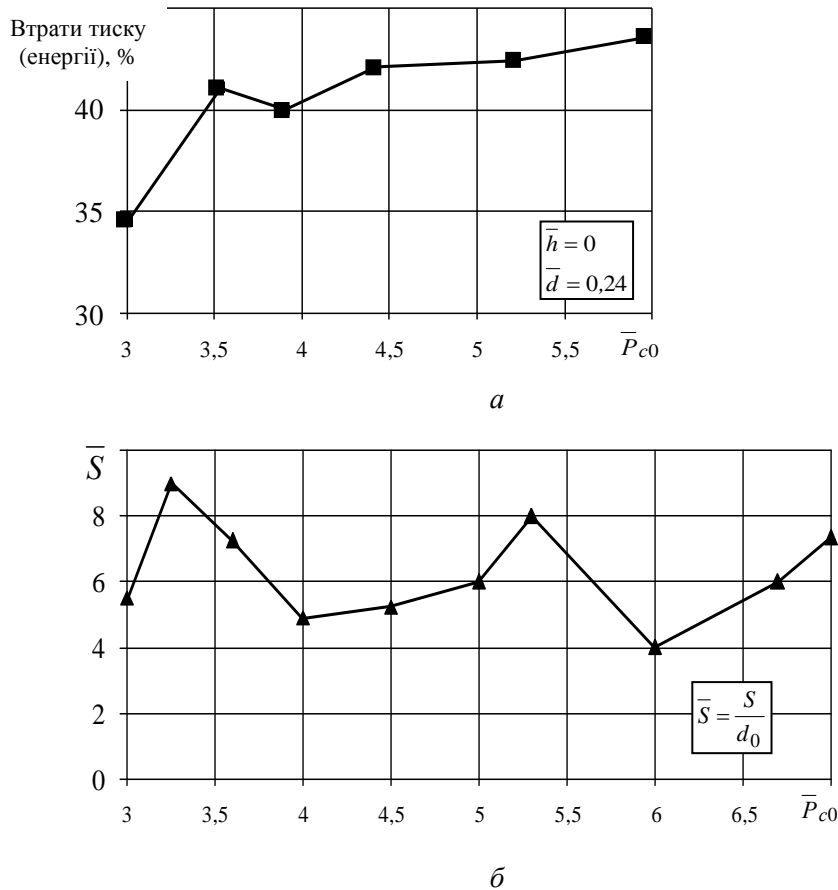


Рис. 2. Порівняння втрат тиску (енергії) звукової струмینی та довжини початкової (газодинамічної) ділянки струмینی:
a – власні експериментальні дослідження;
б – експериментальні дослідження [4]

На рис. 2 наведено порівняння втрат тиску (енергії) звукової струмینی та довжини початкової (газодинамічної) ділянки струмینی, за допомогою якого можна одержати залежність втрат енергії струмینی від відносної довжини початкової ділянки струмینی.

У разі значень відносного тиску повітря перед соплом $\bar{P}_{c0} < 7,0$ виявляють періодичний характер зміни втрат енергії струмینی та відносної довжини початкової ділянки струмینی, що підтверджує різний характер впливу ЗАЗ на

структуру звукової струмینی у випадку значень відносного тиску повітря перед соплом менших і більших за 7,0.

На рис. 3 зображено залежність втрат тиску (енергії) звукової струмینی від відносного діаметра циліндричної колби та відносного тиску повітря перед соплом.

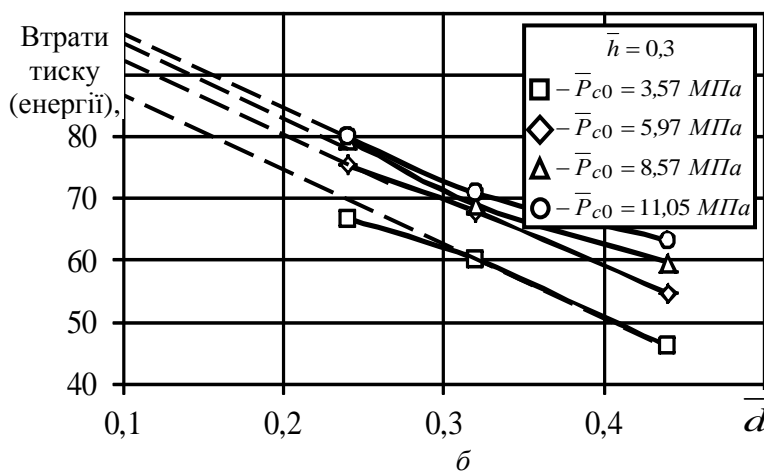
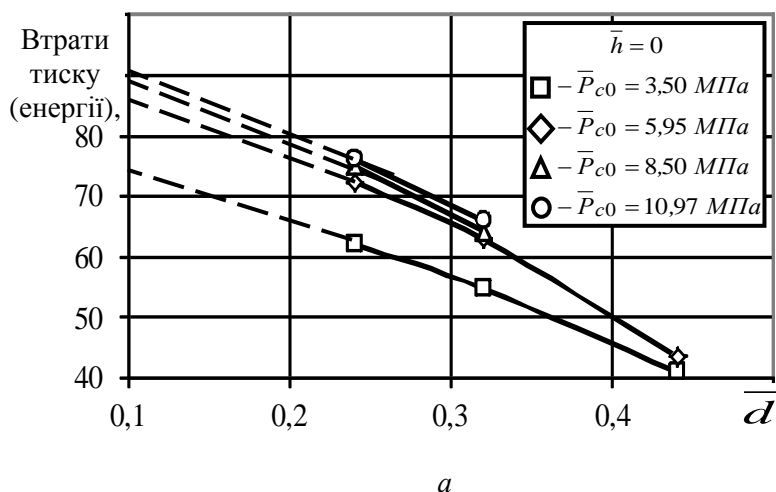


Рис. 3. Залежність втрат тиску звукової струмینی від відносного діаметра циліндричної ємності (\bar{d}) і відносного тиску повітря перед соплом (\bar{P}_{c0}):
 $a - \bar{h} = 0$; $b - \bar{h} = 0,3$

Проаналізувавши рис. 3, можна зробити такі висновки:

– у випадку збільшення тиску газу перед соплом до значень, характерних, наприклад, для продувки розплаву металу в конвертері, втрати енергії струмینی майже не залежатимуть від тиску газу перед соплом;

– у разі значень відносного тиску повітря перед соплом $\bar{P}_{c0} < 7,0$ нелінійний характер залежності втрат енергії струмینی від відносного діаметра циліндричної колби переходить у лінійний, що ще раз доводить зміну характеру впливу ЗАЗ на структуру струмینی, а також на втрати енергії.

Результати теоретичних досліджень. Застосування експериментальних даних для конструктивних розробок доволі проблематичне, оскільки під час розрахунку газодинамічних характеристик звукових газових струмин, застосованих у технологічних і теплотехнічних процесах різних галузей промисловості, зокрема в металургії, необхідно враховувати масштабний фактор, зміну теплофізичних властивостей газової струмини тощо.

Усунути цей недолік і зробити експериментальний матеріал універсальним можна шляхом застосування теорії подібності та узагальнення експериментальних даних у вигляді критеріальних рівнянь, що дозволить безпосередньо застосовувати результати експериментальних досліджень у конструкторських розрахунках.

Критеріальну залежність у загальному вигляді можна навести так:

$$\bar{P}_{abcn} = c \cdot \bar{P}_{c0}^n \cdot \bar{d}^m, \quad (1)$$

де $\bar{d} = \frac{d_0}{D}$ – відносний діаметр перешкоди; d_0 – діаметр вихідного отвору сопла;

D – діаметр циліндричної колби; $\bar{P}_{abcn} = \frac{P_{атм} + P_{abcn}}{P_{атм}}$ – абсолютний відносний тиск повітря на торець циліндричної колби.

Втрати тиску звукової газової струмини ΔP (у відсотках від відносного тиску газу перед соплом) за рахунок впливу ЗАЗ на структуру струмини розраховують за формулою

$$\Delta P = \frac{\bar{P}_{abcn}}{\bar{P}_{c0}} 100. \quad (2)$$

Коефіцієнти c , n та m у рівнянні (1) обчислено за результатами експериментальних досліджень і наведено нижче (табл. 1).

Таблиця 1

Коефіцієнти критеріального рівняння

Коефіцієнт	c	n	m
Значення	2,42	0,59	1,0

Таким чином, у критеріальній залежності (1) наявні основні конструктивні та газодинамічні характеристики струмини й робочого простору теплотехнічного або теплотехнологічного агрегату.

Водночас за допомогою критеріальних рівнянь неможливо описати загальні закономірності впливу ЗАЗ на структуру звукових і надзвукових струмин. Для цього необхідне застосування математичного моделювання впливу зворотного акустичного зв'язку на структуру газової струмини.

Різні погляди на формування ЗАЗ і його вплив на газодинамічні характеристики струмин зумовлюють різноманіття підходів щодо математичного моделювання впливу ЗАЗ на газодинамічні характеристики струмини.

Поряд із першими працями, присвяченими математичному моделюванню ЗАЗ [1;13;15], з'явилися сучасні погляди на проблему математичного моделювання впливу ЗАЗ на характеристики звукових і надзвукових газових струмин [12;14;17]. Проте за допомогою цих математичних моделей неможливо знайти спільні ознаки впливу ЗАЗ на структуру звукових і надзвукових струмин, оскільки, з одного боку, зафіксовано спроби побудувати модель на основі відомих диференціальних рівнянь

газодинаміки та акустики, що призводять до одержання тривіальних розв'язків, які правильні з математичного погляду, але задовольняють експериментальні дані в обмеженому діапазоні газодинамічних характеристик струмини, а з іншого – спроби «звужувати» математичні моделі, тобто застосовувати такі математичні моделі, які задовільно описують лише декілька параметрів струмин у разі впливу ЗАЗ на звукові й надзвукові струмини.

Найповніший аналіз сучасних експериментальних досліджень, які стосуються впливу ЗАЗ на структуру звукових і надзвукових струмин, наведено в [6]. Автори наголошують, що діапазон впливу дискретного тону на початкову (газодинамічну) ділянку звукової та надзвукової струмин газу залежить від міри нерозрахованості струмини. У свою чергу відносна довжина початкової ділянки струмини $\bar{S} = \frac{S}{d_0}$ є

функція лише міри нерозрахованості струмини n [12], тобто $\bar{S} = f(n)$. Таким чином, можна зробити висновок, що в разі досягнення довжиною початкової ділянки струмини певного значення дискретний тон перестає впливати на її структуру.

Отже, нас цікавить визначення залежності скорочення довжини початкової (газодинамічної) ділянки звукової та надзвукової струмин за рахунок руйнування бочкоподібної структури струмини від тиску газу перед соплом, тобто від міри нерозрахованості струмини.

У [1] запропоновано таку формулу для розрахунку довжини початкової (газодинамічної) ділянки звукової або надзвукової струмини:

$$\bar{S} = l + 4 \cdot \lambda, \quad (3)$$

де l і λ – безрозмірна довжина періодичних структур початкової ділянки звукової або надзвукової струмини.

Із формули (3) випливає, що за будь-якого значення міри нерозрахованості струмини бочкоподібна структура початкової ділянки струмини складається з п'яти комірок. Довжина комірок, у свою чергу, уже залежить від міри нерозрахованості струмини.

У [8] наголошено на тому, що початкова ділянка струмини складається з шести хвилевих конфігурацій. Перша хвилева конфігурація має вигляд бочки, а п'ять інших – вигляд конусів.

Довжину першої (бочкоподібної) хвилевої конфігурації розраховують за формулою

$$\bar{S}_0 = \frac{S_0}{d_0} = 8,13 \left(\frac{P_{c0}}{P_{атм}} \right)^{0,53}. \quad (4)$$

Довжина кожної конусоподібної хвилевої конфігурації зменшується із віддаленням потоку від сопла, її апроксимують залежністю

$$\bar{S}_N = \frac{S_N}{d_0} = (0,9501 - 0,0532 \cdot N) \left(\frac{P_{c0}}{P_{атм}} \right)^{0,5731 \cdot N - 0,021}, \quad (5)$$

де N – номер комірки конусоподібної конфігурації.

Довжина початкової (газодинамічної) ділянки звукової або надзвукової струмینی

$$\bar{S} = \bar{S}_\delta + \sum \bar{S}_N . \quad (6)$$

Із урахуванням того, що в праці [16] указано на наявність п'яти джерел випромінювання дискретного тону, розташованих у площині кінців комірок початкової ділянки струмینی, можна зробити висновок, що для акустично ізолюваного сопла початкова ділянка струмینی складається з п'яти або шести комірок, причому перша комірка має бочкоподібну структуру з прямим стрибком ущільнення (дискон Маха), а інші комірки – без прямого стрибка ущільнення.

На рис. 3 наведено експериментальні дані з публікації [4], а саме залежність довжини початкової ділянки струмینی від тиску газу перед соплом за відносних значень цього тиску $\bar{P}_{c0} \leq 6,0$. На початкову ділянку струмینی впливає лише ЗАЗ, що утворюється в результаті відбивання звукових хвиль від кромки сопла. Порівняння цих даних із розрахунками, виконаними за формулами (3) – (6), правдивими для звукоізолюваних сопел, наведено нижче (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння довжини початкової ділянки (\bar{S}) і кількості комірок бочкоподібної структури (n_δ) для звукоізолюваного та неізолюваного сопел

\bar{P}_{c0}	3,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Звукоізолюване сопло								
\bar{S}	5,1	6,0	6,4	6,8	7,2	7,5	7,8	8,1
n_δ	5 – 6	5 – 6	5 – 6	5 – 6	5 – 6	5 – 6	5 – 6	5 – 6
Неізолюване сопло								
\bar{S}	5,1	4,8	4,8	5,9	7,1	4,0	5,3	7,7
n_δ	5 – 6	4 – 5	4 – 5	4 – 5	5 – 6	3 – 4	4 – 5	5 – 6

За результатами розрахунку (табл. 2) можна бачити, що за відносних значень тиску перед соплом $\bar{P}_{c0} \leq 6,0$ руйнується тільки одна остання комірка бочкоподібної структури початкової ділянки струмینی.

Розрахунок пояснює результати експериментальних досліджень, у яких виявлено різний характер впливу ЗАЗ на структуру звукової і надзвукової струмін за значень відносного тиску газу перед соплом менших і більших за 7,0. Зокрема, за $\bar{P}_{c0} \leq 7,0$ відбувається значне зниження втрат енергії струмینی.

Висновки. По завершенню експериментальних досліджень автори сформулювали основні результати роботи.

1. Виконано фізичне моделювання процесу дисипації енергії звукової газової струмینی за рахунок впливу на неї ЗАЗ та проаналізовано результати експериментальних досліджень.

2. Узагальнено експериментальні дослідження дисипації енергії звукової газової струмینی на основі теорії подібності.

3. Доведено, що за відносних значень тиску перед соплом $\bar{P}_{c0} \leq 6,0$ відбувається руйнування зворотним акустичним зв'язком тільки однієї останньої комірки бочкоподібної структури початкової ділянки струмینی.

4. Запропоновано алгоритм, за допомогою якого можна адаптувати формулу для розрахунку втрат енергії імпульсними струминами, зокрема струминами, які в результаті взаємодії з розплавом металу формують заглиблення (лунку) в розплаві металу, наприклад під час продувки конвертера або мартенівської ванни.

Бібліографічні посилання

1. **Анцупов, А.В.** Исследование параметров нерасчетной сверхзвуковой струи газа [Текст] / А.В. Анцупов // Журн. техн. физики. – 1974. – Т. 44. – №2. – С. 372 – 379.
2. **Гичёв, Ю.А.** Обратная акустическая связь в структуре газовой струи при продувке расплава [Текст] / Ю.А. Гичёв, Т.А. Василькив, В.А. Перцевой // Прикл. пробл. аэрогидромеханики та тепломасопереносу: матеріали V міжнар. наук. конф. 6 листоп. – 8 листоп. 2014р. – Д., 2014. – С. 137 – 139.
3. Особенности аэроакустики сверхзвукового течения в технологических процессах [Текст] / П.А. Деливеров [и др.] // Гидродинам. пробл. технол. процессов. – М., 1988. – С. 102 – 110.
4. **Еремин, Г.И.** Акустическое воздействие на течение и спектр шума сверхзвуковых струй [Текст] / Г.И. Еремин, В.И. Кондратьев // Аэроакустика. – М., 1980. – С. 119 – 123.
5. **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 технол. процессах. – М., 1981. – С. 59 – 62.
6. Обратная акустическая связь сверхзвуковых струй при различных режимах истечения [Текст] / Е.А. Капустин [и др.] // Гидроаэромеханика и теория упругости. Межвуз. сб. – 1981. – Вып. 28. – С. 23 – 27.
7. **Капустин, Е.А.** Влияние акустического воздействия на динамические характеристики сверхзвуковой нерасчётной струи [Текст] / Е.А. Капустин, О.Э. Шлик, В.Н. Евченко // Механика турбулентных потоков. – М., 1980. – С. 259 – 269.
8. **Лакоткин, Ю.Б.** Исследование длины и волновой структуры газодинамического участка в прямой и растекающейся газовых струях [Текст] / Ю.Б. Лакоткин // Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа. – 1983. – №1. – С. 163 – 165.
9. **Лухтура, Ф.И.** Одномерная теория сверхзвуковых нерасчетных струй газа [Текст] / Ф.И. Лухтура // Там же. – 1993. – №1. – С. 48 – 56.
10. **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 // Пробл. турбулентных течений. – М., 1987. – С. 149 – 152.
11. **Alkisar, M.** Stereoscopic PIV measurements of a screeching supersonic jet [Text] / M. Alkisar, L. Lourenco, A. Krothapalli // J. of Visualization. – 2000. – Vol. 3, №2. – P. 135 – 143.
12. An approach to noise reduction of a supersonic jet with a spherical reflector [Text] / M. Khan [et al.] // Acoustical Science and Technology. – 2004. – Vol. 25, №2. – P. 136 – 143.
13. Flow field and noise characteristics of a supersonic impinging jet [Text] / A. Krothapalli [et al.] // J. of Fluid Mechanics. – 1999. – Vol. 392. – P. 155 – 181.
14. **Nakazono, Y.** Near-field acoustic characteristics of underexpanded jets from notched nozzles [Text] / Y. Nakazono // J. of the Japanese Society for Experimental Mechanics. – 2011. – Vol. 11. – P. 47 – 52.
15. **Raman, G.** Cessation of screech in underexpanded jets [Text] / G. Raman // J. of Fluid Mechanics. – 1997. – Vol. 336. – P. 69 – 90.
16. **Rice, E.J.** Screech noise source structure of a supersonic rectangular jet [Text] / E.J. Rice, R. Taghavi // Papers of American Institute of Aeronautics and Astronautics. – AIAA – 92 – 0503. – P. 1 – 17.
17. On the noise of jet from a small scale axisymmetric convergent nozzle impinging on a large flat plate [Text] / Y. Zhaohui [et al.] // Proceedings of the Fifth JFPS International Symposium on Fluid Power, November 12 – 15. – 2002. – Nara (Japan), 2002.

Надійшла до редколегії 20.04.2016