

УДК 669.056

**Ю. А. Гичев, Т. А. Василькив, В. А. Перцевой**

Национальная металлургическая академия Украины,

г. Днепропетровск, Украина,

Днепропетровский национальный университет железнодорожного

транспорта имени академика В. Лазаряна, г. Днепропетровск, Украина

## **ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА СТРУКТУРУ ГАЗОВОЙ СТРУИ ПРИ ПРОДУВКЕ РАСПЛАВА**

### **Аннотация**

*Обоснована необходимость учета влияния обратной акустической связи при расчете газодинамических характеристик звуковых и сверхзвуковых струй.*

*Выполнено физическое моделирование процесса диссипации энергии звуковыми газовыми струями вследствие воздействия на них обратной акустической связи. Анализ результатов экспериментальных исследований и обобщение результатов представлены на основе теории подобия.*

*Полученные при обработке результатов экспериментальных исследований критериальное уравнение и соответствующие коэффициенты уравнения могут быть использованы для определения диссипации энергии звуковых и сверхзвуковых газовых струй вследствие воздействия на них обратной акустической связи.*

*Ключевые слова: газодинамика, звуковые и сверхзвуковые струи, обратная акустическая связь, продувка расплава, скачки уплотнения.*

### **Abstract**

*Necessity of the account of influence of acoustic feedback is proved for calculation of gasdynamic characteristics of sonic and supersonic jets.*

*Physical modelling of energy dissipation process by sonic gas jets due to influence of acoustic feedback is maintained. The results of experimental researches are analyzed. Generalization of experimental researches of energy dissipation of sonic gas jets on the basis of the theory of similarity is executed.*

*Criterial equation and corresponding coefficients of equation received at treatment of results of experimental researches can be used for definition of the dissipation of energy of sonic and supersonic gas jets owing to influence of acoustic feedback on them.*

*Keywords: gasdynamic, sonic and supersonic jets, acoustic feedback, blowing through melt, shock waves.*

Звуковые и сверхзвуковые газовые струи нашли широкое применение в технологических и теплотехнических процессах металлургического производства.

Газодинамические характеристики таких струй оказывают значительное влияние на интенсивность тепло- и массообменных процессов конвертерного и мартеновского способов производства стали, внепечной доводки стали, диспергирования расплава металла с целью

его рафинирования, а также в ряде других процессов.

Управление газодинамическими характеристиками звуковых и сверхзвуковых струй позволяет создавать энергоэффективные режимы технологических и теплотехнических процессов.

Газодинамические и акустические характеристики газовых струй тесно связаны между собой. В первую очередь это касается звуковых и сверхзвуковых струй.

Известно, что при истечении из сопла, звуковые и сверхзвуковые газовые струи генерируют звуковое излучение, которое способно изменять структуру, газодинамические характеристики и, собственно, само звуковое излучение струи [1-3].

Акустическому излучению звуковых и сверхзвуковых газовых струй присущи следующие особенности:

- интенсивность акустического излучения распределяется по частотам неравномерно;
- на определенных частотах интенсивность излучения значительно увеличивается (такие частоты имеют название дискретной составляющей или дискретного тона).

Эффект обратной акустической связи (ОАС) может рассматриваться как влияние собственного акустического излучения струи определенной (дискретной) частоты на структуру газодинамического (начального) участка струи, т. е. на скачки уплотнения [4].

Влияние ОАС на скачки уплотнения приводит к отклонению (раскачиванию) скачков уплотнения, следствием чего является их разрушение [5].

Таким образом, пренебрежение влиянием собственного акустического излучения на структуру струи приводит к значительной погрешности при расчете ее газодинамических характеристик.

Путем усиления, затухания или устранения эффекта ОАС можно получить струю с требуемыми, а главное, прогнозируемыми газодинамическими параметрами, что дает возможность влиять на характеристики струи на дозвуковом участке течения, где, преимущественно, протекают процессы смешения струи с окружающей средой.

Анализ известных экспериментальных и теоретических исследований [6–9], посвященных изучению ОАС в условиях теплотехнических и технологических процессов металлургического производства, позволяет сделать следующие выводы.

На газодинамические характеристики звуковых и сверхзвуковых струй и, что важно для тепло- и массообменных процессов в металлургии, на дальнобойность таких струй влияют следующие факторы: угол раскрытия сопла; давление газа перед соплом; диаметр выходного отверстия сопла; степень нерасчетности струи; число Маха в выходном отверстии сопла; температура газа перед соплом; температура среды, в которую истекает струя; коэффициент отражения звука средой, в которую истекает струя, и прочее.

Основное внимание в работах [6–9] уделено изучению влияния отдельных факторов на газодинамические характеристики струи, и практически не освещены вопросы, связанные с обобщением влияния этих факторов, а именно:

- влияние комплекса указанных выше факторов на интенсивность ОАС;
- влияние геометрических характеристик объекта и (или) среды, с которым взаимодействует струя, на характер диссипации энергии струи в результате воздействия на нее ОАС.

В связи с этим проведено экспериментальное исследование влияния ОАС на диссипацию энергии звуковых и сверхзвуковых газовых струй.

В экспериментальных исследованиях имитация среды, с которой взаимодействует

струя, выполнена с помощью цилиндрической емкости. Такая имитация является вполне приемлемой, поскольку, например, при продувке металла в конвертере или ванны мартеновской печи струя формирует цилиндрическое углубление в расплаве металла.

Сущность эксперимента заключалась в измерении давления на торец цилиндрической емкости, который имитировал поверхность расплава металла, например, в конвертере.

Эксперимент охватывал следующие значения газодинамических и геометрических параметров струи и цилиндрической емкости:

- диаметр выходного отверстия сопла находился в пределах  $d_0 = 0,012 \div 0,027$  м ;
- диаметр цилиндрической емкости  $D = 0,04 \div 0,08$  м ;
- глубина цилиндрической емкости  $H = 0,12 \div 0,24$  м ;
- относительный диаметр цилиндрической емкости  $\bar{d} = d_0/D = 0,20 \div 0,44$  ;
- угол между осью сопла и осью канала  $\varphi = 0^\circ$  ;
- относительное расстояние от выходного отверстия сопла до днища тупикового канала  $\bar{h} = h/d_0 = 4,44 \div 20,30$  ;
- абсолютное давление воздуха перед соплом  $P_{c0} = 0,24 \div 2,12$  МПа .
- число Маха в выходном отверстии сопла  $M_0 = 1,0$  .

Площадь выходного отверстия сопла совмещалась с площадью входного отверстия цилиндрической емкости, что соответствовало максимальному приближению сопла при имитации продувки расплава металла кислородной струей в конвертере.

Имитация поверхности расплава металла, например в конвертере, с помощью торца цилиндрической емкости является вполне приемлемой, поскольку коэффициенты отражения звуковой волны, которая генерируется струей, от поверхности расплава металла и от поверхности торца цилиндрической емкости отличаются менее чем на 1,0 % [10].

Для обобщения экспериментальных данных и получения зависимостей, связывающих диссипацию энергии струи с геометрическими и динамическими характеристиками сопла и газовой струи в виде критериального уравнения, использовалась теория подобия.

Зависимость газодинамического подобия для случая фронтального взаимодействия струи представляется следующим образом:

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

Симплексы, характеризующие относительное давление воздуха на днище цилиндрической емкости и давление воздуха перед соплом, определяются соотношениями:

$$\bar{P}_{абс\ T} = P_{атм} + P_{абс\ T} / P_{атм} \quad (2)$$

$$\bar{P}_{c0} = P_{атм} + P_{c0} / P_{атм} \quad (3)$$

Потери давления газовой струи  $\Delta P$  (в процентах от относительного давления газа перед соплом  $\bar{P}_{c0}$ ) за счет влияния ОАС на структуру струи, определяются по формуле:

$$\Delta P = (\bar{P}_{абс\ T} / \bar{P}_{c0}) \cdot 100 \quad (4)$$

Коэффициенты  $c$ ,  $n$  и  $m$  в уравнении (1), вычисленные по результатам экспериментальных данных, представлены в таблице.

Коэффициенты критериального уравнения при фронтальном  
взаимодействии струи с поверхностью расплава

Коэффициент	c	n	m
Значение	2,42	0,59	1,0

**Выводы**

Уравнение (4) с учетом значений коэффициентов, представленных в таблице, может быть использовано для определения диссипации энергии звуковых и сверхзвуковых газовых струй за счет воздействия на них ОАС.

**Список использованных источников**

1. Powell, A. On the noise emanating from a two-dimensional jet above the critical pressure [Text] // *Aeronautical Quarterly*. – 1953. – Vol. 4. – P. 103–122.
2. Powell, A. On the mechanism of choked jet noise [Text] // *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] // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. – 1954. – Vol. 26, № 1. – P. 2–8.
4. Деливеров П. А., Капустин Е. А., Нещерет В. П. и др. Особенности аэроакустики сверхзвукового течения в технологических процессах [Текст] // *Гидродинамические проблемы технологических процессов*. – М., 1988. С. 102–110.
5. Alkisar, M., Lourenco L., Krothapalli A. Stereoscopic PIV measurements of a screeching supersonic jet [Text] // *Journal of Visualization*. – 2000. – Vol. 3. №2. – P. 135–143.
6. Капустин, Е.А., Шлик О. Э., Евченко В. Н. Влияние акустического воздействия на динамические характеристики сверхзвуковой нерасчетной струи [Текст] // *Механика турбулентных потоков*. – М., 1980. – С. 259–269.
7. Капустин Е. А., Ленцов И. А., Нещерет П. А. и др. Обратная акустическая связь сверхзвуковых струй при различных режимах истечения [Текст] // *Гидроаэромеханика и теория упругости: межвузовский сборник*. – 1981. – Вып. 28. – С. 23–27.
8. Деливеров П. А., Капустин Е. А., Нещерет В. П. и др. Особенности аэроакустики сверхзвукового течения в технологических процессах [Текст] // *Гидродинамические проблемы технологических процессов*. – М., 1988. С. 102–110.
9. Капустин Е. А. Исследование около- и сверхзвуковых струй и их взаимодействия с газами, жидкостями и металлическими расплавами [Текст] // *Проблемы турбулентных течений*. – М.: Наука, 1987. – С. 106–114.
10. Абрамов О. В., Хорбенко И. Г., Шwegла Ш. Ультразвуковая обработка материалов [Текст]. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.