

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**НАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ**  
**УКРАИНЫ**

**МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

**В ДВУХ КНИГАХ**

**КНИГА ВТОРАЯ**

**Издается с 1999 года**

**Днепропетровский**  
**Пороги**  
**2005**

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЗВУКОВЫХ И ДОЗВУКОВЫХ ИМПАКТНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ В ТУПИК

*Предложена концепция расчета истечения струи газа в цилиндрический тупиковый канал. Получены газодинамические характеристики импактной и полуограниченной турбулентной струи.*

### Введение

Натекание осесимметричной звуковой (дозвуковой) газовой струи на боковую поверхность цилиндрического тупикового канала рассматривается, как один из частных случаев струйных течений в тупиковых полостях. Решение задачи об истечении сверхзвуковой газовой струи в тупик является весьма важной научно-практической проблемой при разработке системы газодинамического разделения стали и шлака при выпуске плавки из конвертеров.

### Постановка задачи

Теоретическое исследование процесса задирання одной или несколькими газовыми струями потока шлако-металлической эмульсии в летке конвертера практически отсутствует. Так, в работах [1–2] представлены лишь общие схемы устройства пневматической отсечки шлака с указанием отдельных показателей экономической эффективности системы. Анализ работ, связанных с решением данной проблемы, выявляет отсутствие точного решения задачи об истечении струи газа в цилиндрический тупик с произвольным отношением длины к диаметру. В частности, в работе [3] не учитывается вытеснение газа из тупикового канала (распространение струи во встречном потоке), что, естественно, влияет на точность решения. В работах [4–5] экспериментальное исследование динамики течения струи в тупиковом канале производилось при совмещении среза сопла и среза тупикового канала. Очевидно, что геометрические размеры сопла влияли в этом случае на характер вытеснения газа из тупикового канала. Кроме того, экспериментальное исследование газодинамических характеристик импактной струи осуществлялось лишь при натекании струи газа наорец (днуще) тупикового канала. Следует также отметить достаточно

большой круг исследуемых параметров струи. Как правило, решение задачи сводится к определению закона изменения скорости вдоль оси струи.

Из литературных источников [1 – 2] известно, что в процессе закрутки шлакового потока с помощью системы газодинамической отдушки шлака происходит проникновение газа в отверстие летки конвертера и частичное вытеснение шлака в полость конвертера. Указанный процесс подобен процессу истечения газа в тупиковый канал. В данном случае в качестве боковых стенок тупикового канала выступают цилиндрическая часть летки конвертера, в качестве торца тупикового канала – плоскость шлака в летке. Очевидна явная недостаточность экспериментального и теоретического базиса для определения газодинамических характеристик импактной и полуограниченной струи и оценки их энергетического потенциала.

### Экспериментальная часть

С целью определения давления торможения в дренажных отверстиях на торце и боковых стенках канала было проведено экспериментальное исследование процесса истечения одиночной осесимметричной звуковой нерасчетной изотермической струи газа в цилиндрический тупиковый канал. Схема расположения дренажных отверстий в тупиковом канале представлена на рисунке 1. В процессе экспериментального исследования варьировали следующие геометрические и энергетические характеристики: предсопловое давление газа (давление газа в форкамере перед соплом)  $P_{\text{ам}} = 5, 7, 9, 11 \text{ атм}$ , расстояние от среза сопла до среза тупикового канала  $h = 240 \pm 416 \text{ мм}$ , угол между осью сопла и плоскостью среза тупикового канала  $\varphi = 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ , диаметр тупикового канала  $D = 40, 60, 80 \text{ мм}$ . Глубина тупикового канала по всем опытам составляла  $H = 150 \text{ мм}$ . Расстояние между дренажными отверстиями равнялось 30 мм.

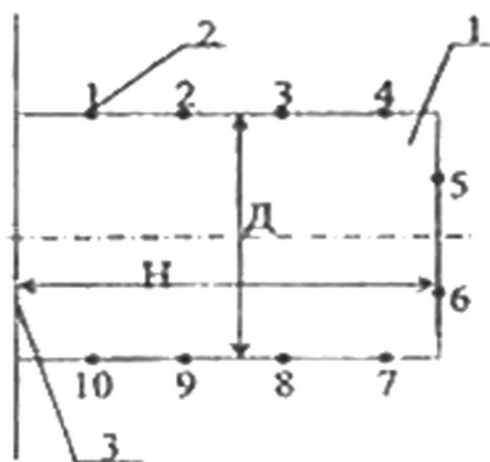


Рис. 1. Схема расположения дренажных отверстий на модели тупикового канала:  
1 – тупиковый канал;  
2 – дренажные отверстия (1-10); 3 – плоскость среза тупикового канала

### Разработка концепций расчетной модели процесса

На основании проведенных экспериментальных исследований разработана математическая модель распределения основных гидродинамических параметров в импактной и полуограниченной струях.

Взаимодействие струи газа с тупиковым каналом происходит на переходном или основном участке  $x$  (под переходным участком будем подразумевать область течения струи, в которой статическое давление в струе равно атмосферному, а скорость на оси струи сверхзвуковая). При экспериментальном исследовании истечения струи в тупиковый канал, когда  $\varphi < 90^\circ$  первичное натекание струи осуществлялось не на торец, а на боковую стенку тупикового канала. Распределение гидродинамических параметров в свободной турбулентной струе, а также в полуограниченной струе, распространяющейся вдоль боковой стенки канала, описывается известными зависимостями [6 – 7]. При дальнейшем распространении полуограниченной струи вдоль стенки происходит натекание струи на торец канала. В действительности полуограниченная струя представляет собой совокупность пристенного гидродинамического и струйного пограничных слоев. Анализ научных публикаций свидетельствует об отсутствии теоретических и экспериментальных исследований в области исследования взаимодействия пристенного слоя с препятствием. В предлагаемой модели расчета импактных струй вводятся следующие допущения и гипотезы:

- предлагается рассматривать пристеночную полуограниченную струю в виде невязанной (вторичной) осесимметричной струи, истекающей из плоскости торца;

- профиль скорости в пристеночной струе аналогичен профилю скорости в свободной осесимметричной струе, поскольку, согласно [8], толщина пристенного гидродинамического пограничного слоя бесконечно мала – максимум скорости располагается практически вдоль торца канала;

- скорость на оси вторичной струи  $W_x$ , истекающей на торец заглушенного канала равна скорости на внешней границе пристенного пограничного слоя  $u_n$  в области взаимодействия пограничного слоя с торцом

$$W_x = u_n; \quad (1)$$

- вследствие равенства расходов втекающего и вытесняемого газа толщина пограничного слоя  $\delta$  принимается равной радиусу тупикового канала;

- относительно расстояние от оси вторичной струи вдоль торца

щина определяется по формуле

$$\bar{r} = \frac{r}{2 \cdot B}, \quad (2)$$

поскольку толщина пограничного слоя является радиусом "сопла" вторичной струи.

— расстояние от среза "сопла" вторичной струи до преграды (горла канала) определяется как расстояние от критической точки до преграды;

— в случае, если статическое давление во вторичной струе при втекании ее на противоположную стенку тупикового канала (натекающую третичной струи) выше атмосферного, производится "дорасширение" струи до статического давления в струе, равного атмосферному;

— за счет "дорасширения" струи происходит увеличение осевой скорости третичной струи, которая определяется по формуле

$$W_n = u_m + W_{n, \text{дон}}; \quad (3)$$

— в качестве "радиуса" третичной струи выступает толщина пограничного слоя вторичной струи вторичной струи, который определяется по известной зависимости [9];

— скорость на внешней границе пристенного пограничного слоя для области переходного течения определяется по формуле

$$u_m = \left[ 1,8 \cdot (1 + \cos \varphi) \cdot \left( \frac{d_0}{r} \right)^{0,5} \right] \cdot u_*, \quad (4)$$

в которой предлагается заменить функциональную зависимость  $u_m = f_1(W_0)$  функцией  $u_m = f_2(W_0, n)$ , что вполне обоснованно, поскольку в [7] проводилось исследование исключительно свободных струй, а также пристеночных потоков без дополнительной (искусственной) турбулизации. В данном случае наблюдается безусловное взаимное влияние истекающего и вытесняемого потоков газа, при этом в области тупикового канала течение газа условно можно классифицировать как распространение турбулентной струи во встречном потоке. Таким образом, при взаимодействии свободных струй с плоским неограниченным препятствием (неограниченной пластиной) скорость в пристеночном пограничном слое полуограниченной струи может определяться только скоростью истечения. В случае ограничения расширения струи спутным либо встречным потоком очевидно, что скорость в пристеночном пограничном слое полуограниченной струи будет зависеть не только от гидродинамических характеристик свободной струи — скорости истечения, но также от характеристик области взаимодействия пограничного слоя полуограниченной струи со встречным потоком.

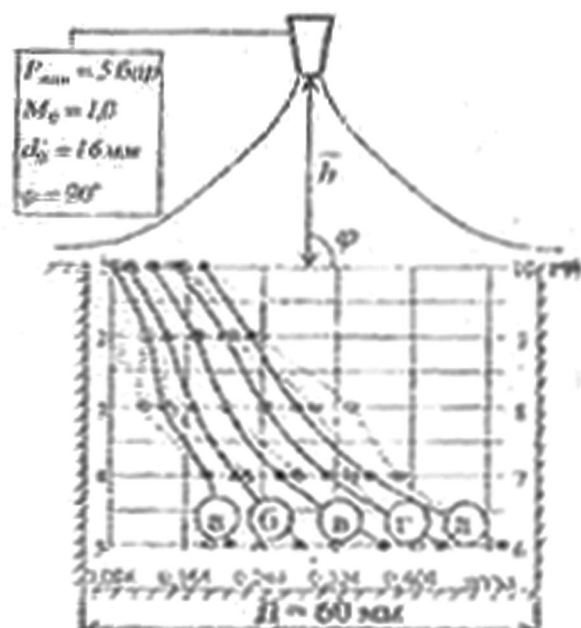
Распределение других газодинамических параметров во второй и третьей независимых струях (ламинарном и турбулентном пограничном слое пристеночной полуограниченной струи) определяется на основании методик, предложенных в [6 - 7].

Определение давления торможения в струе при истечении следней в тупиковый канал при использовании вышеизложенной методики показывает хорошую сходимость расчетных результатов с результатами экспериментальных исследований (см. рис. 2, 3).



— экспериментальные данные  
 (орезанные отверстия № 1-5);  
 — экспериментальные данные  
 (орезанные отверстия № 6-10);  
 — расчетные данные  
 (орезанные отверстия № 1-5);  
 — расчетные данные  
 (орезанные отверстия № 6-10).

Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных



$4 - h = 26; 6 - h = 22;$   
 $8 - h = 18; 2 - h = 15;$   
 $10 - h = 13.$

Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

### Выводы

В результате расчетов, проведенных на основании предложенной методики, выявлены закономерности распределения давления вдоль стенок и дна тупикового канала; получены математические зависимости для определения скорости на внешней границе пристеночного пограничного слоя в переходной области течения, а также для определения осевой скорости вторичной и третьей струй.

Следует отметить, что при разработке математической модели процесса определения сложности вызывает оценка факторов, влияющих на течение струи в тупиковом канале. Так, например, без проведения дополнительных экспериментальных исследований весьма трудно учесть влияние потока вытесняемого газа на поток истекаемого газа. Как указывалось выше, истекающая струя притягивается усиленно изотермической, хотя в зависимости от конструкции системы гидродинамической отсечки шлака разница температур истекающей струи и окружающей среды может быть существенной. В качестве перспектив для дальнейших исследований необходимо отметить следующие направления: исследование газодинамики процесса истечения нескольких сверхзвуковых (звуковых) струй газа в тупиковый канал; исследование общего поля скоростей при взаимодействии нескольких газовых струй под углом  $\varphi < 90^\circ$ .

#### Список литературы

1. Eysn M. Pneumatic slag stopper for oxygen converters // Iron and Steel Engineer. - 1983. - № 10. - P. 53 - 55.
2. Lebeda I. Bezstruskový odpich kyslíkového konvertoru v IŽVŘSR // Hutník. - 1990. - V. 40. - № 1. - P. 14 - 18.
3. Черных В.А. Истечение струи в тупик // Известия АН СССР. Серия Механика жидкости и газа. - 1966. - № 2. - С. 139 - 140.
4. Дыбан Б.И., Мазур А.И., Зюк О.Я. Истечение плоской воздушной струи в тупик // Инженерно-физический журнал. - 1971. - Т. 20. - № 6. - С. 1020 - 1026.
5. Дыбан Б.И., Мазур А.И., Зюк О.Я. Особенности истечения плоской воздушной струи в тупик // Теплофизика и теплотехника. - 1971. - Выпуск 19. - С. 41 - 45.
6. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. - М.: Наука, 1969. - 824 с.
7. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. - М.: Машиностроение, 1977.
8. Бродник П.М., Савин В.К. Теплообмен в окрестности критической точки при осесимметричном струйном обтекании плоских поверхностей, расположенных нормально к потоку // ИФЖ. - 1966. - Т. 10. - № 4. - С. 423 - 428.
9. Красников В.В., Данилов Н.А. Исследование тепло- и массообмена при тепловой сушке // Инженерно-физический журнал. - 1965. - Т. 9. - № 5. - С. 632 - 639.

Рукопись поступила 28.05.05.