

УДК 532.525.6

Гичёв Ю.А. — д.т.н., профессор, Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ)

Бершадский А.И. — магистрант, НМетАУ

Израелян К.А. — магистрант, НМетАУ

Перцевой В.А. — к.т.н., доцент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПАКТНОЙ ГАЗОВОЙ СТРУИ

Выполнено экспериментальное исследование характеристик импактной газовой струи, в результате которого сделан выбор конструкции сопла, разработана эпюра давлений на днище тупикового канала, имитирующего летку конвертера, и исследованы запирающие свойства газовой струи в процессе стыковки сопла со сталевыпускным отверстием. Экспериментальные данные могут быть использованы при разработке режимов эксплуатации системы газодинамической отсечки шлака.

Ключевые слова: импактная газовая струя; система отсечки шлака; тупиковый канал; сталевыпускное отверстие.

Введение

Данная работа касается исследования системы газодинамической отсечки шлака при выпуске плавки из сталеплавильных конвертеров [1]. Газодинамическая отсечка шлака представляется одним из наиболее перспективных технических решений для сталеплавильных печей, так как отличается компактностью оборудования, возможностью дистанционного управления, быстродействием и высоким качеством отсечки [2].

В настоящее время ведется поиск наиболее приемлемого технического решения для реализации газодинамической отсечки шлака, что требует разносторонних исследований характеристик импактной газовой струи, максимально приближенных к условиям эксплуатации устройства.

В данной статье приведены результаты исследования характеристик импактной газовой струи применительно к одному из вариантов устройства газодинамической отсечки шлака, разработанному на кафедре промышленной теплоэнергетики НМетАУ [3, 4].

Постановка задачи

Вариант рассматриваемого устройства приведен на рисунке 1.

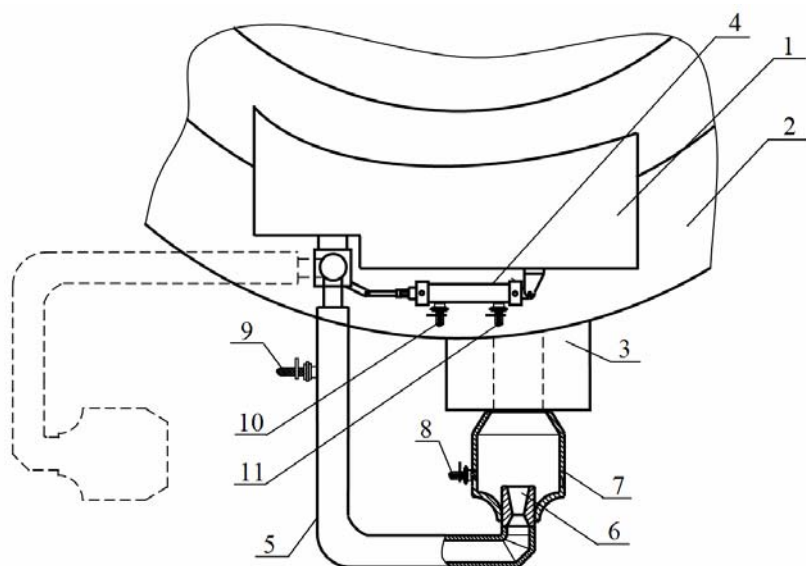


Рис. 1. Вариант устройства для газодинамической отсечки шлака:

- 1 – опорный блок; 2 – корпус конвертера; 3 – летка (сталевыпускное отверстие); 4 – пневмоцилиндр; 5 – поворотный рычаг; 6 – сопло; 7 – насадок; 8, 9, 10, 11 – подвод нейтрального газа

Устройство для отсечки шлака установлено на поворотном рычаге и смонтировано на корпусе конвертера. В момент появления шлака происходит поворот рычага и стыковка сопла через насадку со стале-выпускным отверстием.

При повороте рычага с соплом газовая струя изменяет угол нате-кания и глубину проникновения в сталевыпускное отверстие.

Задача исследований заключалась в определении характеристик импактной газовой струи при стыковке сопла со сталевыпускным от-верстием с учетом изменения угла натекания струи, расстояния сопла до отверстия и глубины проникновения струи при различных давле-ниях газа перед соплом и различных конструктивных характеристиках сопла. В задачу исследования входило также определение запираю-щих свойств газовой струи.

Методика исследования

Исследование выполнено экспериментальным путем. Принципи-альная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Модель, имитирующая сталевыпускное отверстие, представляет собой тупиковый канал, размещенный на кординатнике, что позволяет изменять угол натекания струи на тупиковый канал.

В опытах использовались профилированные звуковые и сверхзвуковые сопла с коническим диффузором.

Относительное располагаемое давление газа перед соплом и абсолютное давление торможения газа вдоль оси свободной струи определялись соотношениями:

$$\bar{P}_c = \frac{P_{c \text{ изб}} + P_{\text{атм}}}{P_{\text{атм}}}, \quad \bar{P} = \frac{P_{\text{изб}} + P_{\text{атм}}}{P_{\text{атм}}}, \quad (1, 2)$$

где $P_{c \text{ изб}}$ – избыточное давление газа перед соплом; $P_{\text{изб}}$ – избыточное давление газа в струе; $P_{\text{атм}}$ – давление во внешней среде (атмосферное давление).

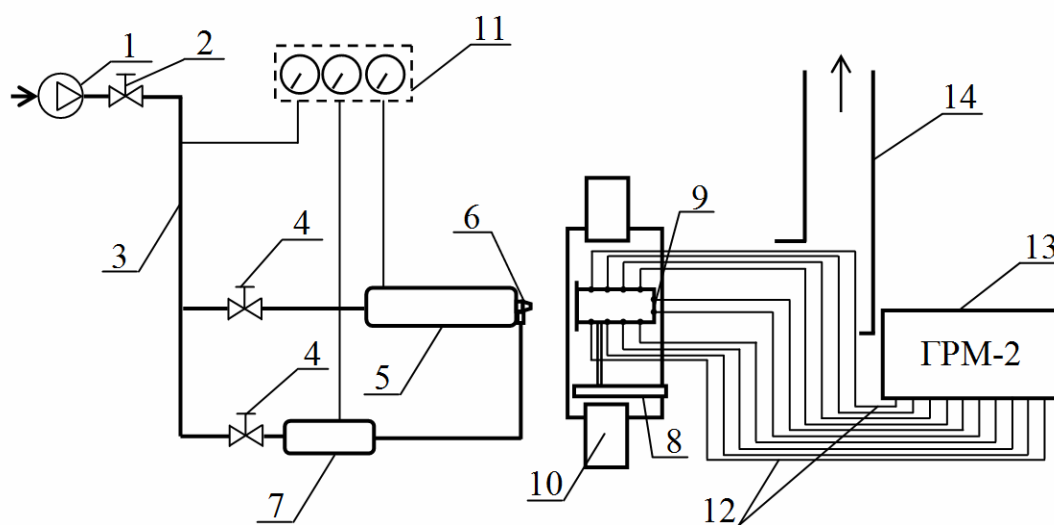


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – компрессор; 2 – запорная задвижка; 3 – воздухопровод высокого давления; 4 – регулирующие задвижки; 5 – форкамера центрального потока; 6 – сопло; 7 – форкамера кольцевого потока; 8 – координатник; 9 – модель тупикового канала; 10 – теневой прибор; 11 – щит образцовых манометров; 12 – пакет импульсных линий; 13 – групповой регистрирующий манометр (ГРМ-2); 14 – воздухоотвод

Для исследования натекания струи на сталевыпускное отверстие в плоскости, совмещенной со срезом тупикового канала, выполнены дренажные отверстия импульсных линий для измерения давления. Для исследования запирающих свойств газовой струи дренажные отверстия выполнены на боковых стенках и в днище тупикового канала.

Схемы расположения дренажных отверстий в плоскости, совмещенной со срезом тупикового канала, и в тупиковом канале приведены на рисунке 3.

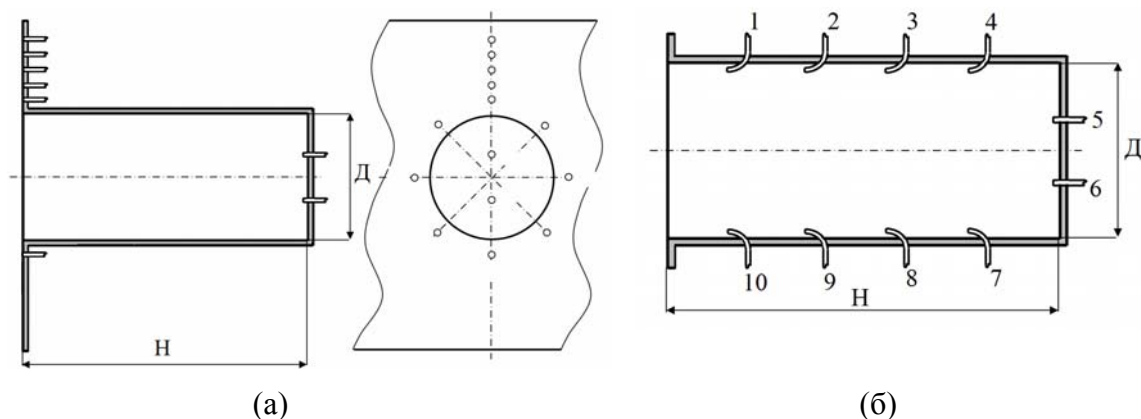


Рис. 3. Схема расположения дренажных отверстий в плоскости, совмещенной со срезом тупикового канала (а), и в тупиковом канале (б):
1..10 – дренажные отверстия для измерения давления

Диапазон изменения конструктивных и газодинамических характеристик в экспериментальном исследовании:

- диаметр критического сечения сопла $d_{кр} = 0,012 \div 0,027$ м;
- диаметр тупикового канала $D = 0,04 \div 0,08$ м;
- глубина тупикового канала $H = 0,12 \div 0,24$ м;
- относительный диаметр критического сечения сопла $\bar{d} = d_{кр} / D = 0,150 \div 0,675$;
- относительное расстояние от сопла до плоскости среза тупикового канала $\bar{h} = h / d_{кр} = 0 \div 28$;
- угол между осью сопла и осью канала $\varphi = 15 \div 60^\circ$;
- абсолютное давление газа перед соплом в форкамере центрального потока $P_c = 0,2 \div 4,8$ МПа;

Обсуждение результатов

В первой серии опытов с целью выбора типа сопла рассматривались характеристики струй, истекающих из профилированного звукового сопла и сверхзвукового сопла с коническим диффузором. Изменение давления вдоль оси начального участка струй представлено на рисунке 4.

Давление газа вдоль оси струи для профилированного звукового сопла изменяется монотонно. Уменьшение давления по мере удаления от среза сопла на начальном участке струи составляет до 12 % и проявляется на границе с переходным участком течения, где сказываются вязкостные составляющие потери давления.

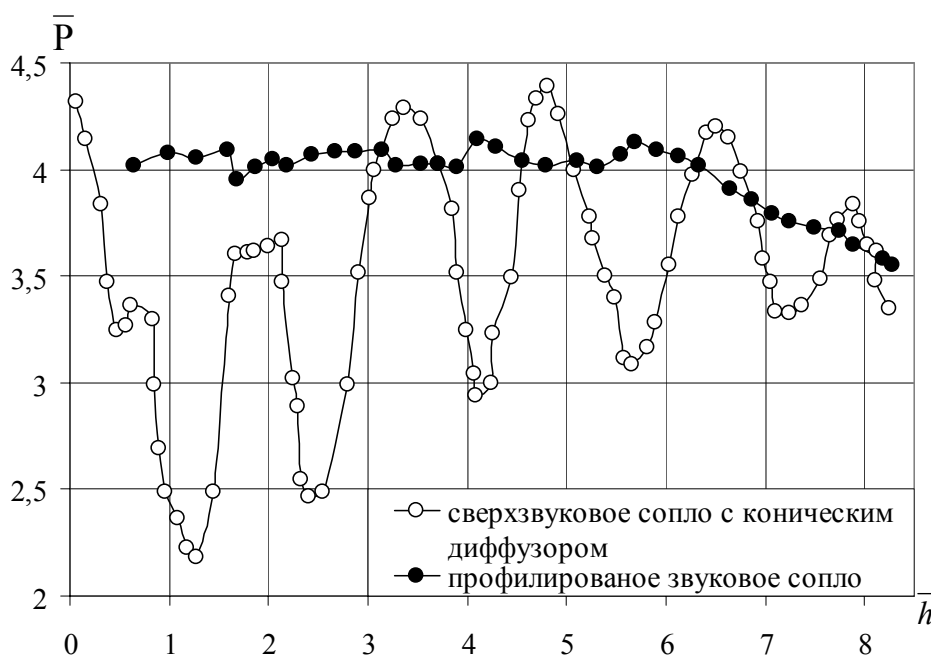


Рис. 4. Изменение давления вдоль оси начального участка струй, истекающих из сверхзвукового сопла с коническим диффузором и профилированного звукового сопла

Для сверхзвукового сопла с коническим диффузором на начальном участке струи наблюдаются резкие колебания давления, связанные с несовпадением оси сопла и векторов скорости газа на выходе из сопла. По мере удаления от среза сопла возмущения затухают вследствие вязких потерь и перестройки векторов полей скоростей газа параллельно оси сопла. Давление на оси струи в начальном участке здесь также, как и для звукового сопла, уменьшается. Уменьшение давления составляет около 16 % по сравнению с давлением на срезе сопла.

Измерение давления на оси струй в переходном и основном участках истечения показало, что давление струи, истекающей из профилированного сопла, резко падает и с увеличением относительного расстояния от сопла до плоскости среза тупикового канала приближается к атмосферному. Струя, истекающая из сверхзвукового сопла с коническим диффузором, сохраняет значительное давление на оси струи вплоть до среза тупикового канала.

В связи с этим дальнейшее исследование проводили с применением сверхзвукового сопла с коническим диффузором.

Давления газа вдоль оси основного участка струи, для сверхзвукового сопла с коническим диффузором, при различных давлениях газа перед соплом представлены на рисунке 5.

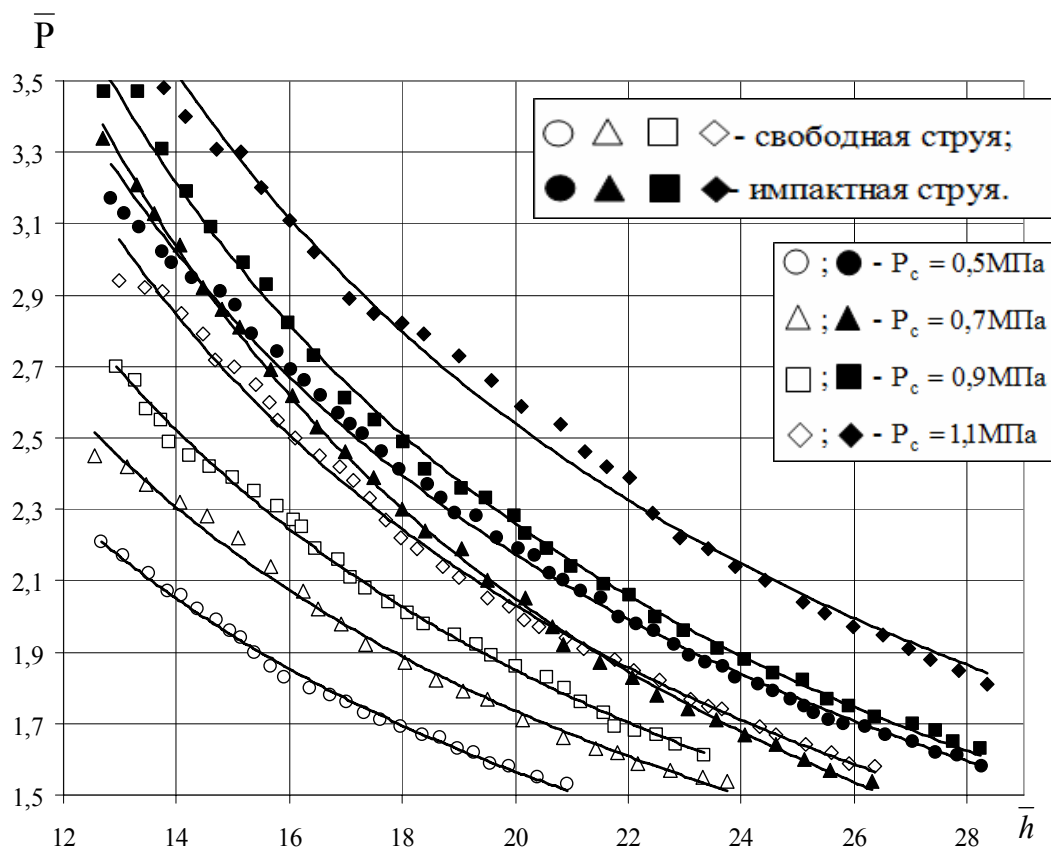


Рис. 5. Изменение давления газа вдоль оси струй, истекающих из сверхзвукового сопла с коническим диффузором, при различных давлениях газа перед соплом

Сравнение выполнено для свободных струй и импактных струй, натекающих на плоскость, совмещенную со срезом тупикового канала.

Во всех вариантах сравнения давление на оси импактных струй выше, чем для свободных струй. Разница в давлении возрастает с увеличением давления газа перед соплом. Это указывает на то, что импактность струи способствует сохранению ее запирающих свойств.

Запирающие свойства струи зависят также от характера натекания струи на тупиковый канал.

Качественные исследования на модели экспериментальной установки позволили выделить характерные варианты натекания струй на тупиковый канал, которые представлены на рисунке 6.

При фронтальном натекании струи на тупиковый канал установлены два варианта взаимодействия.

В первом случае (см. рис. 6а) струя полностью втекает в тупиковый канал. Вытеснение газа из канала происходит вдоль его боковой поверхности. При этом на плоскости среза тупикового канала образуется эжекционное веерное течение окружающего воздуха.

Во втором случае (см. рис. 6б) струя полностью не втекает в тупиковый канал, то есть активная часть струи не достигает днища канала. Вытесняемая из канала струя растекается по плоскости на срезе тупикового канала. В донной части канала образуется вихревое течение, аккумулирующее энергию втекающей струи и амортизирующее давление струи на днище канала, что в целом снижает запирающие свойства струи.

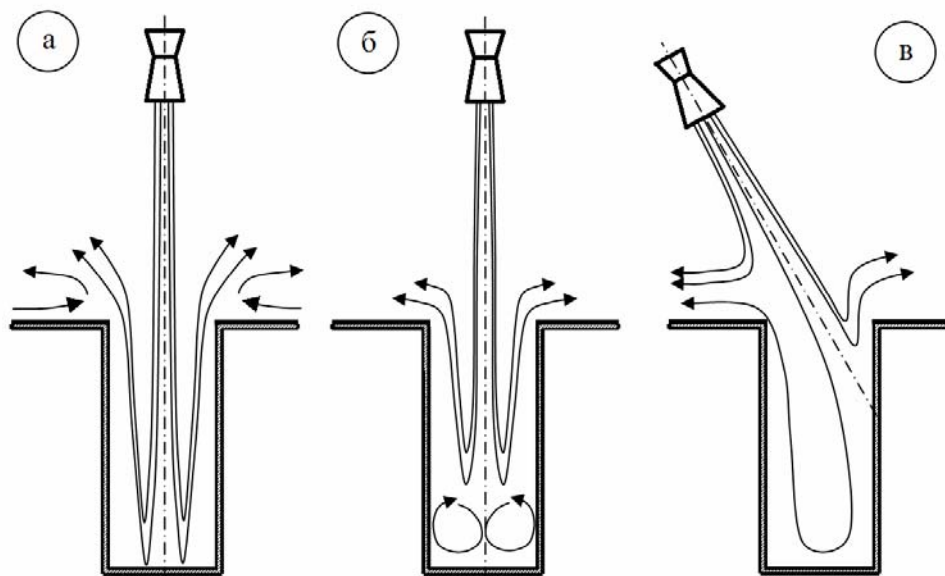


Рис. 6. Варианты взаимодействия импактной газовой струи с тупиковым каналом:
а, б – фронтальное натекание струи на тупиковый канал;
в – боковое натекание струи на тупиковый канал

При боковом натекании струи на тупиковый канал (см. рис. 6в) взаимодействие струи с тупиковым каналом носит комбинированный характер: с одной стороны, струя натекает на боковую стенку канала, а с другой стороны, максимально проникает в полость канала. Причем, с увеличением угла между осью струи и осью тупикового канала глубина проникновения струи в канал уменьшается, а в донной части канала образуется вихревое течение (на рисунке не показано).

Дальнейшие исследования касались запирающих свойств газовой струи. На рисунке 7 показано изменение давления газа на днище тупикового канала при различных давлениях газа перед соплом.

При совмещении сопла с торцом тупикового канала (на рис. 7 сплошные линии, $\bar{h} = 0$) и при удалении сопла от тупикового канала (пунктирные линии, $\bar{h} = 0,3$) зависимость давления газа на днище тупикового канала от давления газа перед соплом практически линейная. Линейность сохраняется и при более значительном удалении сопла, вплоть до $\bar{h} = 1$.

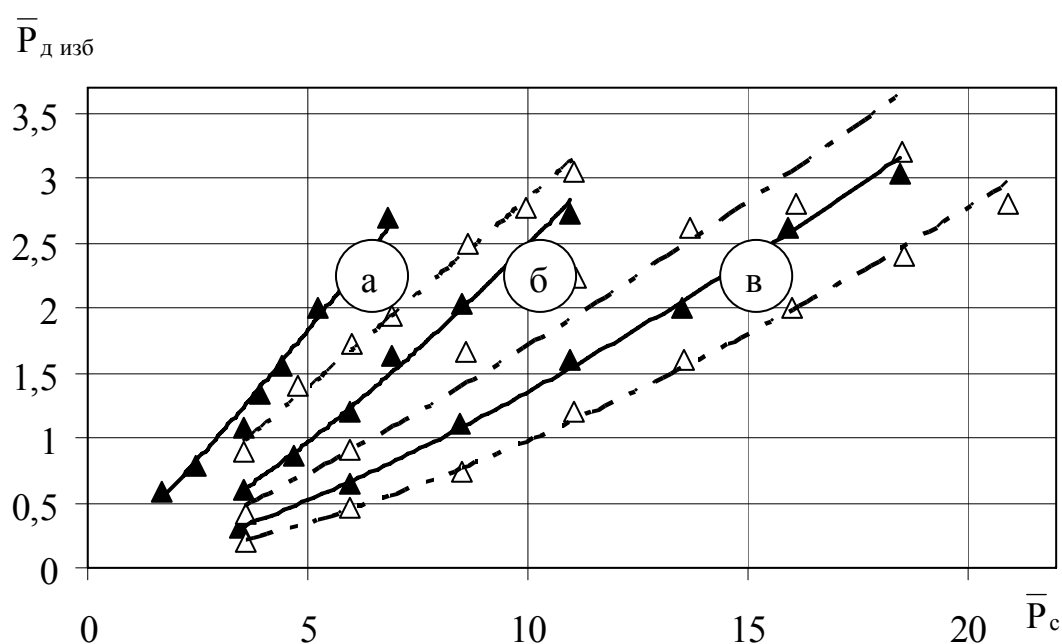


Рис. 7. Изменение давления газа на дне тупикового канала при различных давлениях газа перед соплом:

а, б, в – относительные диаметры сопел
0,24, 0,32 и 0,44, соответственно

При эксплуатации системы газодинамической отсечки шлака давление, необходимое для запираания шлака, изменяется вследствие двух факторов.

Во-первых, в процессе запираания изменяется количество металла в шлаке. Давление, необходимое для запираания шлака при наличии в шлаке 50 % металла, составляет 0,225 МПа, а при 15 % – 0,163 МПа [5].

Во-вторых, в процессе эксплуатации конвертера от одной перефутеровки к другой, то есть в ходе кампании эксплуатации конвертера, происходит разгар сталевыпускного отверстия, что требует наращивания по мере приближения к окончанию кампании давления на сталевыпускное отверстие при отсечке.

Характер изменения давления газа перед соплом вследствие действия указанных факторов иллюстрируется эпюрой давления, представленной на рисунке 8.

Из данных, приведенных на рисунке 8, следует, что в начале кампании эксплуатации конвертера для обеспечения давления в сталевыпускном отверстии, необходимого для запираания шлака, давление перед соплом должно составлять, в зависимости от количества металла в шлаке, 0,38 ÷ 0,70 МПа, а в конце кампании – 1,0 ÷ 1,6 МПа. В целом

приведенная эпюра позволяет оценить интервалы изменения давления газа перед соплом в зависимости от наличия металла в шлаке и периода эксплуатации конвертера.

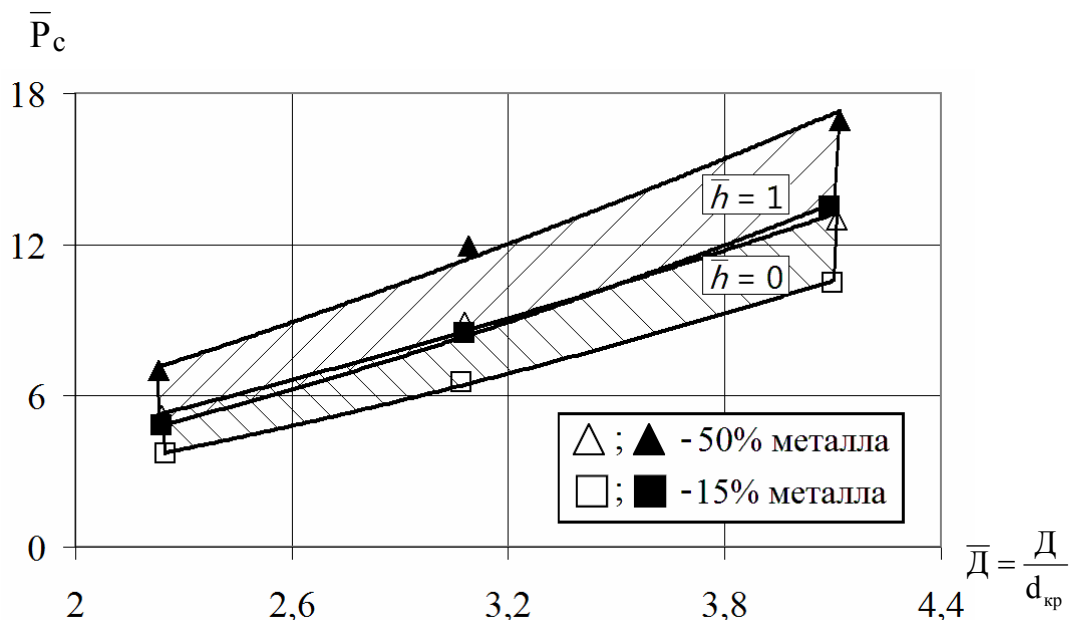


Рис. 8. Зависимость давления газа перед соплом от изменения диаметра тупикового канала, имитирующего летку конвертера

Процесс запираания шлака происходит синхронно с поворотом сопла и сопровождается, соответственно, изменением расстояния от сопла до летки и угла натекания струи на летку, что отражено экспериментальными данными на рисунке 9.

На рисунке 9 пунктиром показан интервал давлений (0,163 ÷ 0,225 МПа), необходимый для отсечки шлака в зависимости от содержания металла в шлаке (15 ÷ 50 %). В соответствии с экспериментальными данными с приближением момента совмещения оси сопла и сталевыпускного отверстия ($\varphi = 30^\circ$) во всем интервале давлений газа перед соплом обеспечивается отсечка шлака.

На процесс отсечки влияет также давление во всем объеме сталевыпускного отверстия. На рисунке 10 показано изменение давления на боковые стенки тупикового канала, из которого следует, что давление, обеспечивающее запираание шлака, достигается перед совмещением оси сопла с осью тупикового канала ($\varphi = 30^\circ$) во всем объеме сталевыпускного отверстия. Точки измерения давления в тупиковом канале показаны на рисунке 3.

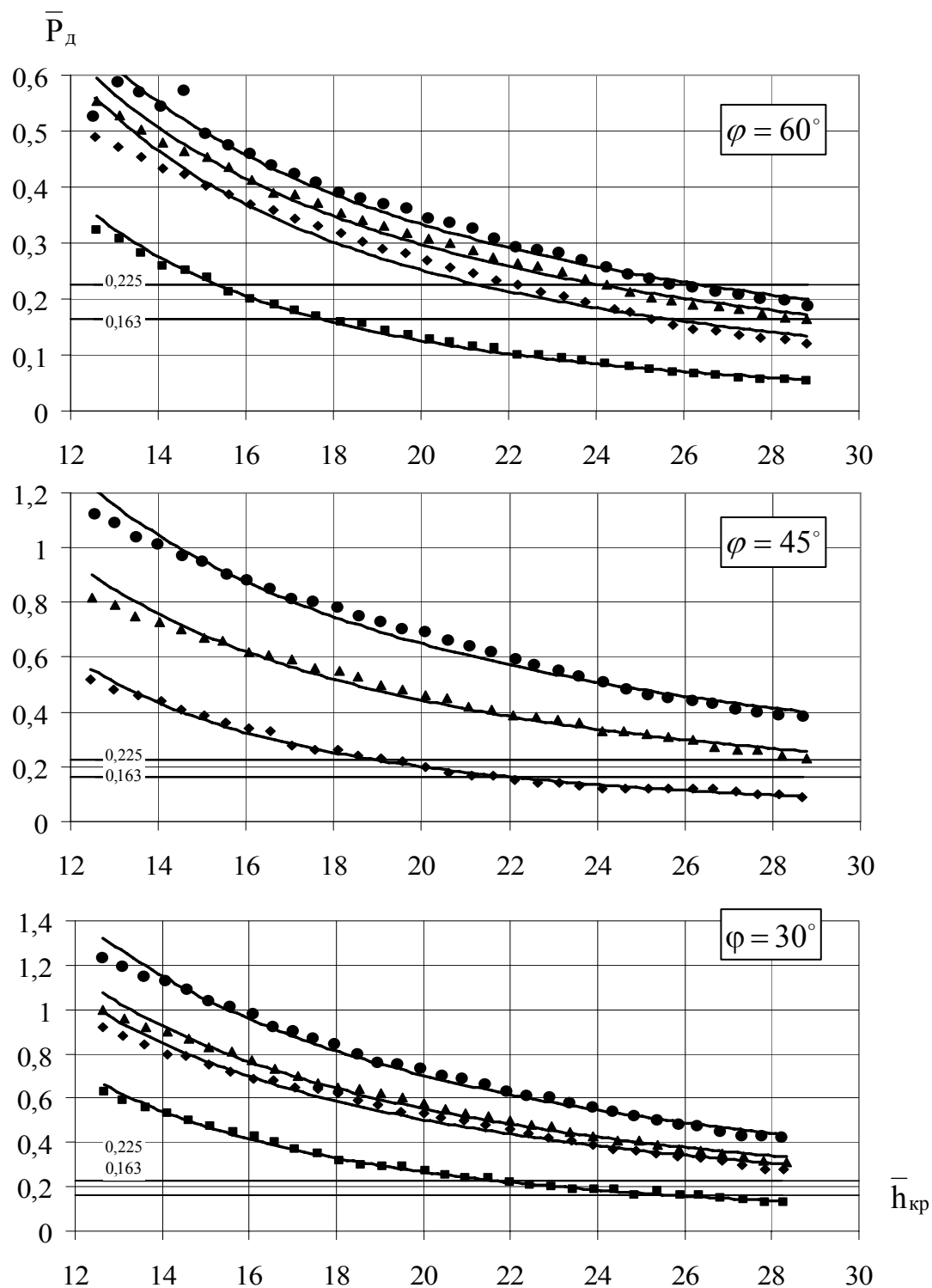


Рис. 9. Зависимость избыточного давления на днище тупикового канала (\bar{P}_d) от расстояния сопла до летки ($\bar{h}_{кр}$) и угла натекания струи, при относительном диаметре тупикового канала $\bar{d} = 0,4$:

- – $\bar{P}_c = 0,6$; ▲ – $\bar{P}_c = 1,0$;
- ◆ – $\bar{P}_c = 0,8$; ● – $\bar{P}_c = 1,2$

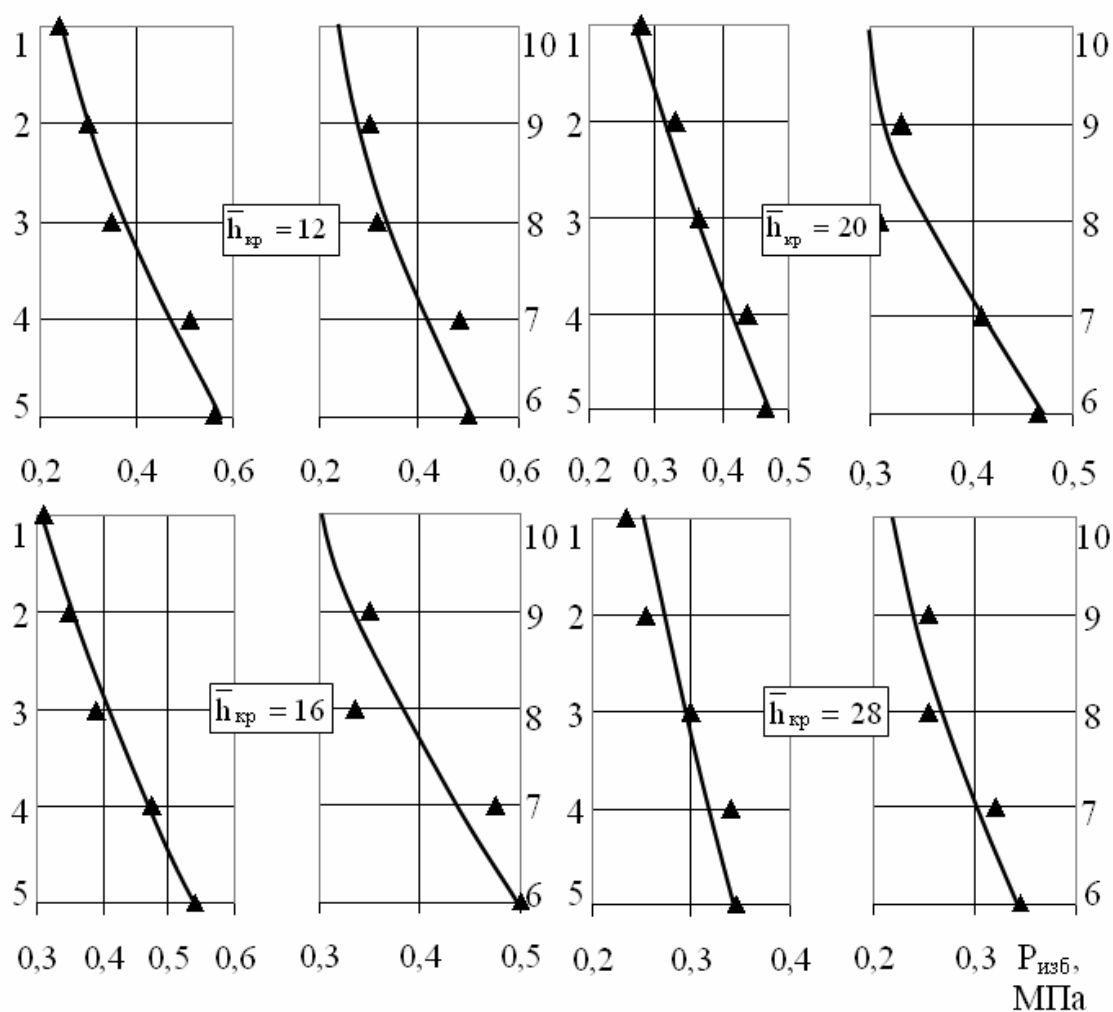


Рис. 10. Изменение давления на боковые стенки тупикового канала при давлении газа перед соплом $P_c = 1,1$ МПа и натекании струи под углом ($\varphi = 30^\circ$):

▲ — экспериментальные данные;

1 – 5 и 6 – 10 на оси ординат графиков – точки измерения давления

Выводы

1. В результате экспериментального исследования характеристик импактной газовой струи сделан выбор конструкции сопла, отвечающей требованиям системы газодинамической отсечки шлака.

2. Разработана эпюра давлений на днище тупикового канала, имитирующего летку конвертера, при различных давлениях газа перед соплом и различных диаметрах сталевыпускного отверстия, изменяющегося в процессе эксплуатации конвертера вследствие разгара.

3. Исследованы запирающие свойства газовых струй в процессе стыковки сопла со сталевыпускным отверстием, сопровождающейся

изменениями угла натекания струи и расстояния от сопла до сталевого пускового отверстия.

4. Экспериментальные данные могут быть использованы при разработке режимов эксплуатации рассмотренного варианта системы газодинамической отсечки шлака.

Список литературы

1. Гичёв Ю. А. Тепловые и газодинамические режимы эксплуатации устройств струйной отсечки шлака / Ю. А. Гичёв, В. А. Перцевой // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 3. – С. 201–204.

2. Гичёв Ю. А. Классификация и сравнение способов отсечки шлака при выпуске стали из конвертеров / Гичёв Ю. А., Перцевой В. А. // *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. – 2009. – № 5 (1313). – С. 32–35.

3. Пат. на корисну модель. № 36614 (Україна). Пристрій газодинамічного відсічення шлаку від рідкого металу Гічов Ю. А., Бичков С. В., Малик О. О., Перцевой В. О. – С21С5/46. – 2008. – 27.10.2008. – Бюл. № 20.

4. Пат. на корисну модель №37728 (Україна). Спосіб газодинамічного відсічення шлаку від рідкого металу / Гічов Ю. А., Бичков С. В., Малик О. О., Жаворонков Ю. І., Перцевой В. О. – С21С5/46. – 2008. – 10.12.2008. – Бюл. № 23

5. Гичёв Ю. А. Экспериментальное исследование запирающих свойств газовой струи / Ю. А. Гичёв, В. А. Перцевой // *Металургійна теплотехніка : збірник наукових праць НМетАУ*. – Дніпропетровськ : ПП. Грек О.С., 2006. – С. 68–76.

Рукопись поступила 10.09.2011 г.