

УДК 669.053:532.525

*Гичёв Ю.А.* – д.т.н., проф., Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ)

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

*Карабеза И.И.* – м.н.с., НМетАУ

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ИНЖЕНЕРНОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАТЕКАНИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ НА ТУПИКОВЫЙ КАНАЛ**

*Данная работа касается системы газодинамической отсечки шлака при выпуске плавки из сталеплавильных конвертеров. Тупиковый канал в эксперименте имитирует летку конвертера, а днище тупикового канала – заторможенный в летке шлак.*

*Для проверки адекватности инженерной и математической модели натекания газовой струи на тупиковый канал разработана специальная методика и выполнено экспериментальное исследование. Сравнение численных и экспериментальных данных показало, что разработанные модели качественно и количественно соответствуют реальному процессу фронтального и бокового натекания газовой струи на тупиковый канал. Относительная погрешность расчета полного давления газа на внутреннюю поверхность тупикового канала при использовании инженерной модели не превышает 22 %, а математической – 12 %.*

*Ключевые слова: тупиковый канал; газовая струя; инженерная и математическая модель; эксперимент; адекватность.*

### **Введение**

Данная работа касается системы газодинамической отсечки шлака при выпуске плавки из сталеплавильных конвертеров, суть которой заключается в воздействии на поток шлака в момент его появления в сталевыпускном отверстии струей газа, запирающей шлак в летке конвертера [1]. По сравнению с другими способами отсечки газодинамическая отсечка отличается быстродействием, возможностью автоматизации и дистанционного управления, отсутствием быстроизнашивающихся элементов и устройств, а также компактностью оборудования [2].

Принятие технических решений при разработке системы газодинамической отсечки шлака требует знания характеристик газовой

струи при натекании её на сталевыпускное отверстие конвертера, что возможно путем инженерного или математического моделирования газовой струи.

### **Постановка задачи исследования**

Достоверность результатов моделирования должна подтверждаться экспериментальным путем, а именно, измерением давления газовой струи, натекающей на тупиковый канал, и сравнением результатов измерений с результатами расчетов. Тупиковый канал в эксперименте имитирует летку конвертера, а днище тупикового канала – заторможенный в летке шлак.

Известные результаты экспериментальных исследований по истечению газовой струи в тупиковый канал не удовлетворяют решению данной задачи. Известные экспериментальные исследования позволяют определить закономерности распределения давления в тупиковом канале только для конкретных, указанных в данных работах, условий [3 – 5].

Задача данных исследований заключалась в экспериментальной проверке адекватности ранее разработанных [6, 7] инженерной (упрощенной) и математической моделей натекания газовой струи на тупиковый канал применительно к системам газодинамической отсечки шлака, предложенных НМетАУ [8 – 10].

### **Методика проведения экспериментов**

Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования процесса натекания газовой струи на тупиковый канал представлена на рисунке 1.

Сжатый воздух от компрессора через форкамеру центрального потока поступает непосредственно к соплу (см. рис. 2). Кольцевой канал и форкамера кольцевого потока в экспериментальной установке предназначены для возможности размещения нескольких сопел перед моделью. Модель, имитирующая летку конвертера, выполнена в виде тупикового канала (см. рис. 3) и размещена на координатнике, что позволяет изменять угол натекания струи на тупиковый канал. Для наблюдения волновой структуры газового потока экспериментальная установка оборудована теневым прибором ИАБ-451.

Суть эксперимента заключалась в измерении давления на боковые стенки и днище тупикового канала при натекании на него газовой струи. Для этого в тупиковом канале выполнены дренажные отверстия, соединенные через импульсные трубки с групповым регистрирующим манометром ГРМ-2.

Оценка точности измерения давления, а также расчет времени демпфирования волновых процессов в импульсных трубках проводились в соответствии с известными методиками [11, 12].

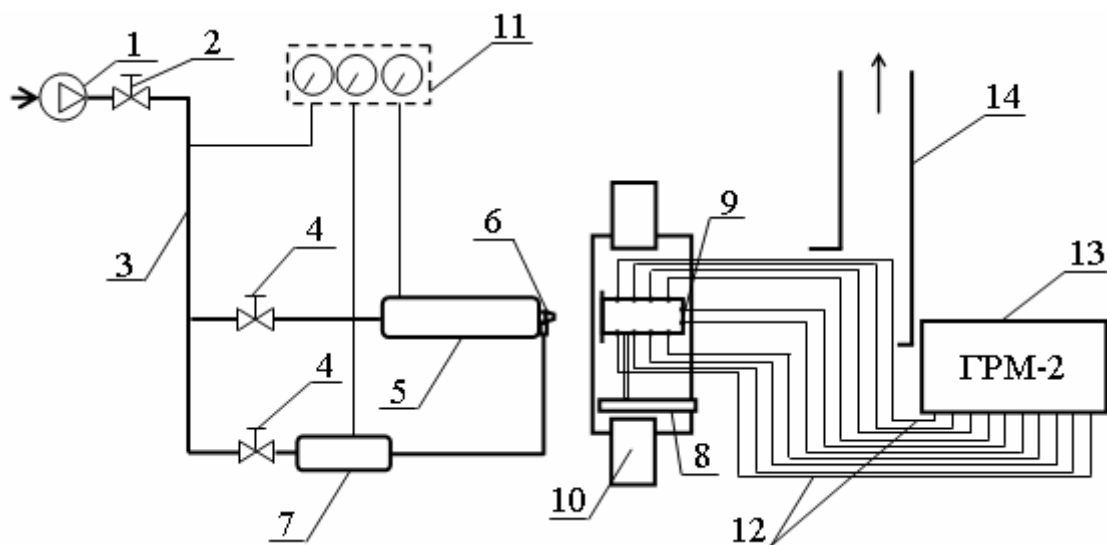


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:  
 1 – компрессор; 2 – запорная задвижка; 3 – воздухопровод высокого давления; 4 – регулирующая задвижка; 5 – форкамера центрального потока; 6 – сопло; 7 – форкамера кольцевого потока; 8 – координатник; 9 – модель тупикового канала; 10 – теневой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

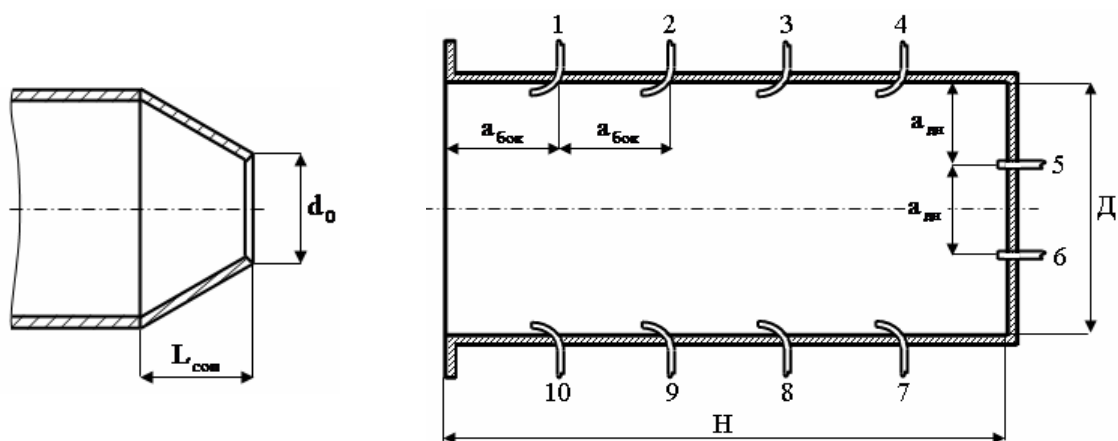


Рис. 2. Коническое сопло:  
 $d_0$  – диаметр выходного сечения сопла;  
 $L_{соп}$  – длина сопла

Рис. 3. Схема расположения дренажных отверстий в тупиковом канале:  
 1...10 – дренажные отверстия импульсных линий;  $a_{бок}$  – шаг дренажных отверстий вдоль боковых стенок тупикового канала;  
 $a_{дн}$  – шаг дренажных отверстий вдоль дна тупикового канала;  $H$  – глубина тупикового канала;  $D$  – диаметр тупикового канала

### Результаты проверки адекватности моделирования

Проверка адекватности моделирования выполнена отдельно для разработанных инженерной и математической моделей [6, 7] при фронтальном и боковом натекании звуковых и сверхзвуковых газовых струй на тупиковый канал.

Расчетные схемы инженерного моделирования приведены на рис. 4.

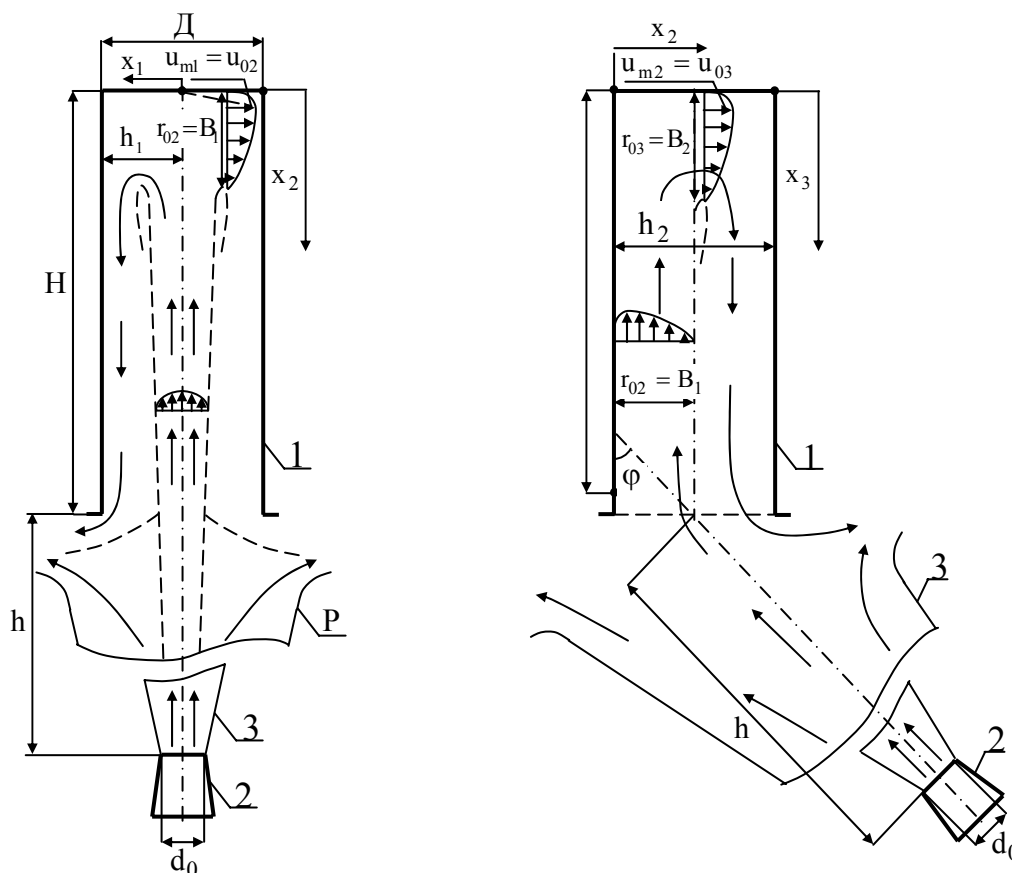


Рис. 4. Схемы фронтального и бокового натекания струи на тупиковый канал при инженерном моделировании процесса

Здесь интерес представляет расчет газодинамических характеристик в пограничном слое струи, который выполняется на основании следующих предположений:

- а) струя при натекании на тупиковый канал встречает две преграды: днище и боковые стенки канала;
- б) осуществляется дорасширение струи с избыточным статическим давлением перед вторичной преградой, то есть перераспределение энергии струи между статическим и динамическим давлениями;
- в) скорость на оси дорасширенной струи при натекании на вторичную преграду составит:

$$u_{02} = u_{m1} + \sqrt{2 \cdot P_{\text{ст изб 1}} / \rho_{\text{атм}}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{атм}}$  – плотность газа при атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup>;  $P_{\text{ст изб 1}}$  – избыточное статическое давление газа, Па;  $u_{m1}$  – скорость на внешней границе пристенного пограничного слоя струи, м/с;

г) пограничный слой первичной струи вследствие малой толщины пристенного слоя рассматривается в качестве струи, натекающей на вторичную преграду.

В соответствии с этим избыточное статическое и динамическое давление вдоль преграды составят:

$$P_{\text{ст изб 1}} = 0,5 \cdot \rho_{\text{атм}} \cdot u_{\text{н}}^2 \cdot e^{-(c_1 \cdot \bar{x}_1)^2}; \quad (2)$$

$$P_{\text{дин}} = (\rho \cdot u^2) / 2, \quad (3)$$

где  $c_1$  – коэффициент в уравнении;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – скорость газа вдоль преграды, м/с.

В целом, избыточное давление газа вдоль преграды составит:

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{ст изб}} + P_{\text{дин}}. \quad (4)$$

Проверка адекватности инженерного моделирования выполнена в два этапа.

На первом этапе исследовалось давление газа на внутреннюю поверхность тупикового канала при фронтальном натекании струи. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными представлено на рис. 5, где  $\bar{h} = h/d$  – относительное расстояние от среза сопла до оси тупикового канала, а  $P_c$  – абсолютное давление газа перед соплом.

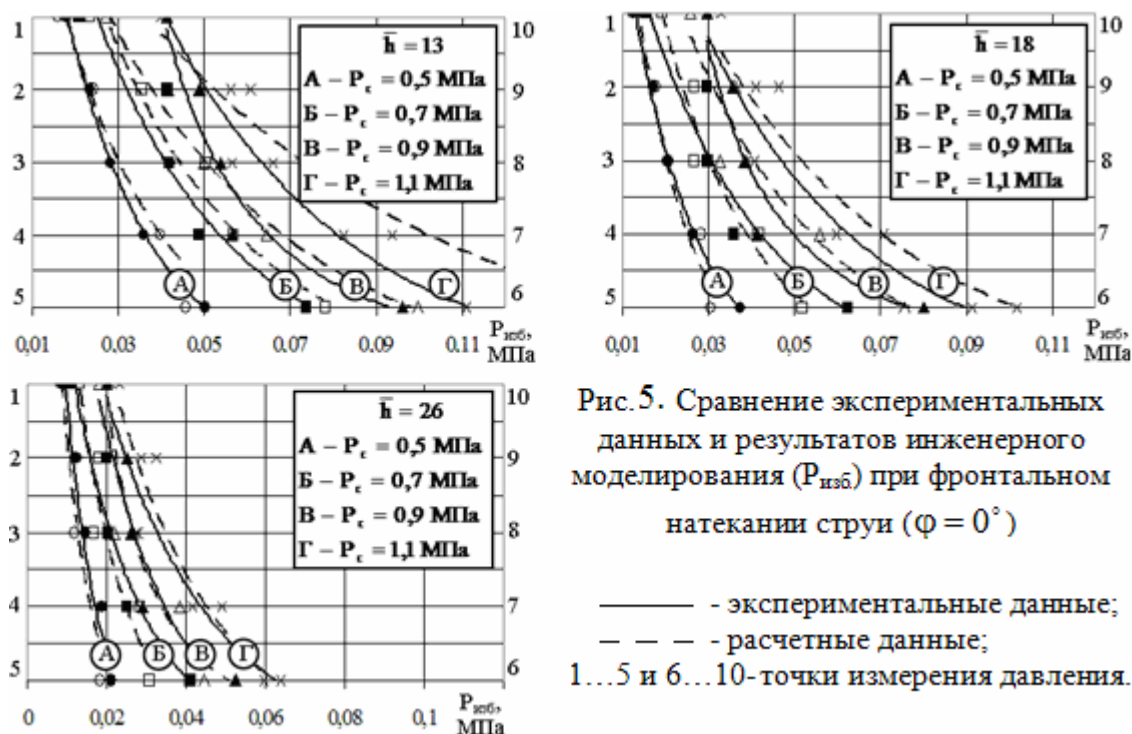
Сравнение давлений газовой струи на внутреннюю поверхность тупикового канала позволяет сделать следующие выводы:

- при прочих одинаковых условиях давление на поверхность тупикового канала возрастает с увеличением давления перед соплом и с уменьшением расстояния между соплом и тупиковым каналом, что свидетельствует об адекватности результатов измерений;

- в тупиковом канале наблюдается устойчивый, симметричный режим течения струи, так как давление газа в дренажных отверстиях №№1-4 и №№ 7-10 идентично;

- при всех значениях давлений газа перед соплом и расстояниях от среза сопла до тупикового канала давление струи на днище канала заметно выше по сравнению с давлением на боковую поверхность канала, что объясняется следующим:

- а) во-первых, реакция днища на втекающую в канал импактную струю соответствует полному давлению струи, приближающемуся к давлению ее торможения;



б) во-вторых, давление на боковую поверхность канала не отражает в достаточной степени полное давление струи газа в связи с большой скоростью струи, турбулизацией струи вблизи кромок дренажных отверстий и параллельностью направления движения струи боковым стенкам канала;

в) в-третьих, давление втекающей в тупиковый канал струи на боковую поверхность канала, также как и в центральной части канала, уравнивается встречным, отраженным от днища, потоком газа.

Второй этап экспериментальных исследований включал измерения давления газа при боковом натекании струи на тупиковый канал. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными представлено на рис. 6.

Здесь так же, как и при фронтальном натекании струи, результаты измерений указывают на адекватный характер взаимодействия струи с тупиковым каналом, то есть давление на внутреннюю поверхность тупикового канала возрастает с увеличением давления газа перед соплом и уменьшением расстояния между соплом и тупиковым каналом.

В числе особенностей бокового натекания струи можно отметить выравнивание по сравнению с фронтальным натеканием давления на внутреннюю поверхность тупикового канала по всей глубине канала.

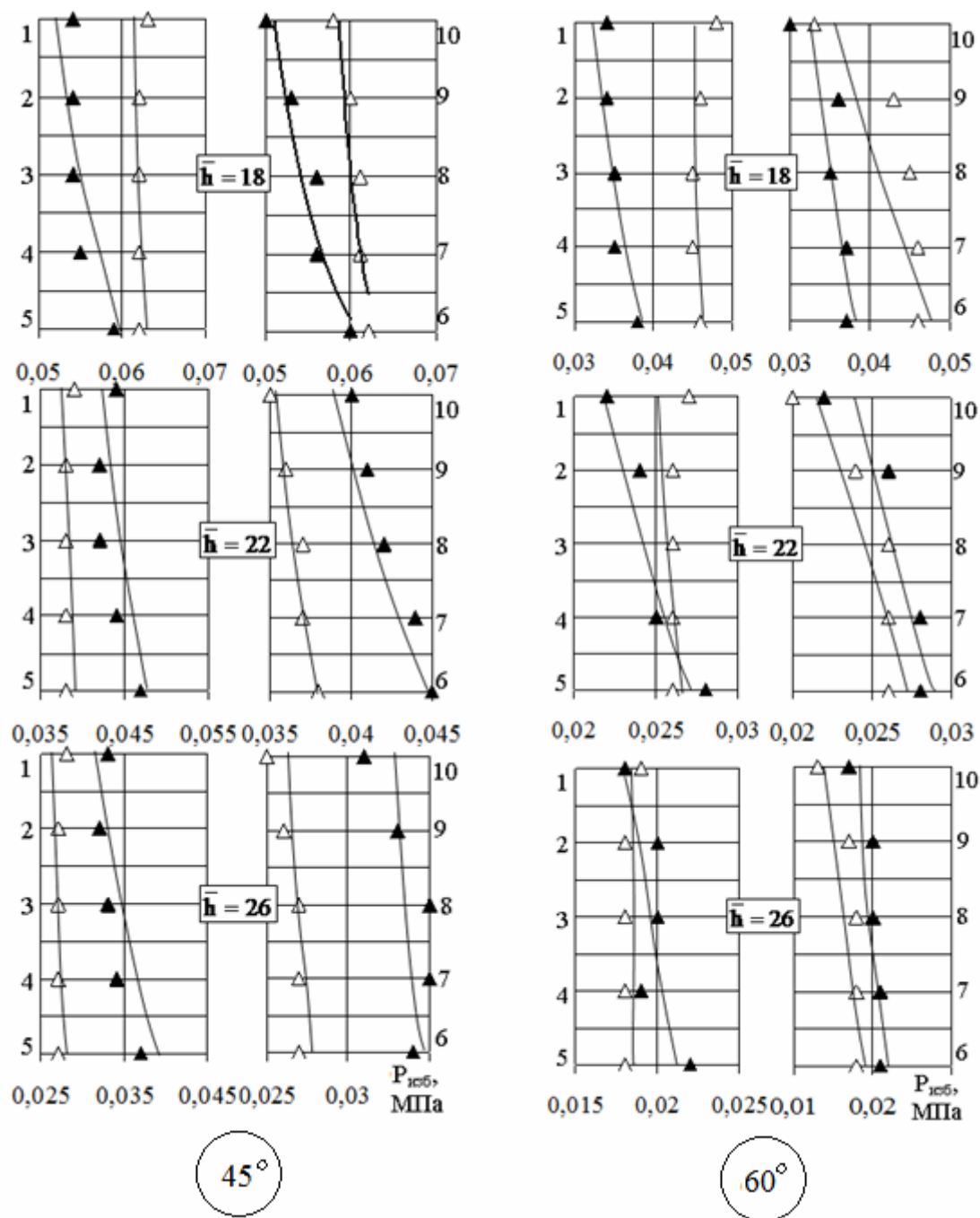


Рис. 6. Сравнение давлений газовой струи на внутреннюю поверхность тупикового канала при боковом натекании струи под углом  $45^\circ$  и  $60^\circ$  (давления перед соплом  $P_c = 0,9$  МПа):

▲ – экспериментальные данные; △ – расчетные данные;  
 1...5 и 6...10 – точки измерения давления

В целом, результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность разработанной инженерной модели как при фронтальном, так и при боковом натекании струи. Относительная по-

грешность расчета инженерной модели для полного давления газа на внутреннюю поверхность тупикового канала в обоих вариантах натекания не превышает 22 %.

Для математической модели натекания газовой струи на тупиковый канал описание движения газа в полости тупикового канала выполнено на основе решения системы дифференциальных уравнений Эйлера для сжимаемого потока:

$$u \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} = 0; \quad (7)$$

$$u \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + k \cdot P \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + k \cdot P \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

где  $u$ ,  $v$  – составляющие скорости газового потока вдоль оси абсцисс и ординат соответственно, м/с;  $P$  – абсолютное статическое давление в потоке газа, Па;  $k$  – показатель адиабаты.

Решение системы дифференциальных уравнений (1 – 8) осуществлялось методом конечных элементов [7]. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными представлено на рис. 7.

Ввиду сложности измерения газодинамических характеристик струи в объеме канала, а также дополнительной турбулизации потока в его полости за счет установки трубок полного давления, исследования ограничивались сравнением давления газовой струи только на внутреннюю поверхность тупикового канала.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность разработанной математической модели, поскольку она качественно и количественно описывает процесс движения газа в тупиковом канале в соответствии с реальными условиями эксперимента.

Погрешность расчета полного давления газа на внутреннюю поверхность тупикового канала не превышает 12 %. Это позволяет рекомендовать предложенную модель для определения основных характеристик, и, в первую очередь, давления газового потока, в объеме тупикового канала.



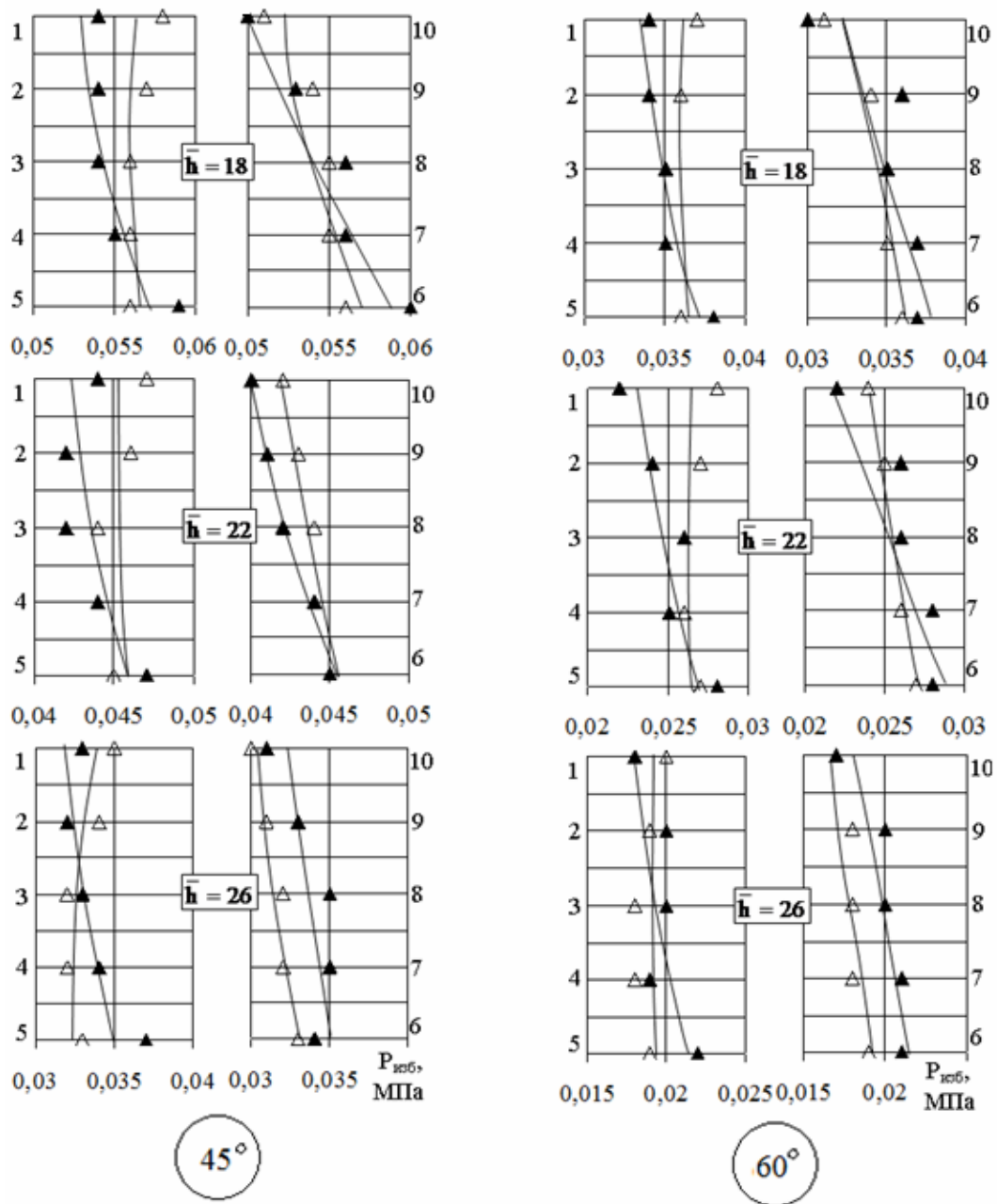


Рис. 7. Сравнение давлений газовой струи на внутреннюю поверхность тупикового канала при натекании струи под углом  $45^\circ$  и  $60^\circ$

(давление перед соплом  $P_c=0,9\text{МПа}$ ):  
 ▲ — экспериментальные данные;  
 △ — расчетные данные;  
 1...5 и 6...10 — точки измерения давления

### Выводы

Для проверки адекватности инженерной и математической модели натекания газовой струи на тупиковый канал разработана специальная методика и выполнено экспериментальное исследование.

Сравнение численных и экспериментальных данных показало, что разработанные модели качественно и количественно соответствуют реальному процессу фронтального и бокового натекания газовой струи на тупиковый канал. Относительная погрешность расчета полного давления газа на внутреннюю поверхность тупикового канала при использовании инженерной модели не превышает 22 %, а математической – 12 %.

### Список литературы

1. Гичёв Ю. А. Исследование газодинамической отсечки шлака при выпуске стали из конвертера / Гичёв Ю.А. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 7. – С. 170–173.
2. Гичёв Ю. А. Классификация и сравнение способов отсечки шлака при выпуске стали из конвертеров / Гичёв Ю. А. *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. – 2009. – № 5(1313). – С. 32–35
3. Дыбан Е. П. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел / Е. П. Дыбан, А. И. Мазур. – К. : Наукова думка, 1982. – 303 с.
4. Дыбан Е. П. Истечение плоской воздушной струи в тупик / Е. П. Дыбан, А. И. Мазур, Э. Я. Эпик // *Инженерно-физический журнал*. – 1971. – Т. 20. – № 6. – С. 1020–1026.
5. Molloy N. A. Oscillatory flow of a jet into a blind cavity / N. A. Molloy, P. L. Taylor // *Nature*. – 1969. – Vol. 224, № 5225. – P. 1192–1194.
6. Гичёв Ю. А. Моделирование газодинамической отсечки шлака, обеспечивающей энерго- и ресурсосбережение при выпуске плавки / Ю. А. Гичёв, В. А. Перцевой // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 4. – С. 84–87.
7. Гичёв Ю. А. Анализ энергетических характеристик турбулентной газовой струи на основе математического моделирования / Ю. А. Гичёв, В. А. Перцевой // *Металургійна теплотехніка : збірник наукових праць Національної металургійної академії України*. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2008. – С. 81–91.
8. 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.
9. Пат. на корисну модель. № 36516 Україна. Пристрій для відділення металу і шлаку / Гічов Ю. А., Бичков С. В., Малик О. О., Перцевой В. О. – С21С5/46, F27D3/15. – 2008. 27.10.2008. – Бюл. № 20.

10. Пат. на корисну модель. № 37729 Україна. Пристрій для випуску металу з конвертера і відсічення шлаку / Гічов Ю. А., Бичков С. В., Малик О. О., Перцевой В. О. – С21В7/14, F27D3/00. – 2008. 10.12.2008. – Бюл. № 23

11. Брянский Л. Н. Краткий справочник метролога: справочник / Л. Н. Брянский, А. С. Дойников. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 79 с.

12. Ратанов Г. С. Методы и средства измерений динамических давлений / Г. С. Ратанов. – Томь : Издательство Томского университета, 1986. – 108 с.

*Рукопись поступила 06.04.2011 г.*