



УДК 669.053

Гичёв Ю.А. /д.т.н./, Перцевой В.А.
НМетАУ**Математическое моделирование запирающих свойств турбулентной газовой струи**

Приведены методика и результаты математического моделирования запирающих свойств турбулентной газовой струи при фронтальном натекании струи на тупиковый канал. Исследования связаны с разработкой системы газодинамической отсечки шлака при выпуске плавки из сталеразливочных конвертеров. Ил. 2. Библиогр.: 9 назв.

турбулентная газовая струя, тупиковый канал, сопло, давление, газодинамическая отсечка шлака, математическое моделирование

Введение

Одной из основных задач совершенствования кислородно-конвертерного производства стали является увеличение выхода годного. Среди прочих, критерием для определения выхода годного является степень угара основных компонентов плавки, которая, в свою очередь, зависит от количества шлака, попадающего в сталеразливочный ковш.

Данная работа касается энерго- и ресурсосбережения в кислородно-конвертерном производстве путем применения газодинамической отсечки шлака при выпуске плавки в сталеразливочный ковш. Сущность указанного способа отсечки заключается в воздействии на поток шлака, появляющегося в сталевыпускном отверстии конвертера, струей газа, что позволяет запереть шлак внутри объема конвертера. Качественное отделение шлака обуславливается определением газодинамических характеристик струи, взаимодействующей с потоком шлака в сталевыпускном отверстии конвертера.

Постановка задачи исследования

Авторами настоящей работы была поставлена задача разработки методики расчета газодинамических характеристик струи при втекании ее в тупиковый канал, а также проверка адекватности модели путем сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Методика расчета и результаты моделирования

В качестве исходных данных для теоретического исследования газодинамических характеристик свободных и импактных струй необходимо задание геометрических параметров сопла, а также расположения преграды, имитирующей сталевыпускное отверстие конвертера относительно сопла. Заданными параметрами струи следует считать число Маха в выходном отверстии сопла M_0 или скорость истечения струи W_0 , диаметр выходного отверстия сопла d_0 . Выходное сечение сопла отстоит от преграды (плоскости среза тупикового канала) на расстоянии h . Угол между осью свободной струи и плоскостью среза тупикового канала составляет Φ градусов [1, 2]. Заметим также, что линейные величины выражены в диаметрах выходного сечения сопла и отмечены чертой над символом, индексами обозначены: 1 - параметры полуограниченной струи вдоль торца тупикового канала, 2 - параметры струи вдоль боковых стенок тупикового канала.

Параметры газа на срезе сопла: статическое давление P , температура торможения T_0^* , скорость истечения W_0 и степень нерасчетности струи n определяются по известным зависимостям, приведенным в [3, 4].

Поскольку распределение газодинамических характеристик в поперечном сечении свободной газовой струи зависит от области ее течения, необходимо определить длину начального и переходного участков струи.

Если преграда располагается в основном (дозвуковом) участке течения свободной струи, распределение осевой скорости при сверхзвуковом

звуковом истечении из сопла описывается выражением [5]

$$W_n = \frac{W_0}{\left(1 + 5,7 \cdot c_0 \cdot \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_m}{\bar{d}_m}\right)}, \quad (1)$$

где c_0 - константа структуры струи, принимаем $c_0 = 0,06$; $\bar{h}_1$ - расстояние от среза сопла до преграды (до торца тупикового канала); $\bar{h}_m$ - расстояние от среза сопла до звукового сечения струи; $\bar{d}_m$ - диаметр звукового сечения струи.

Диаметр звукового сечения струи определяется по формуле [6]

$$\bar{d}_m = 2,72 \cdot \sqrt{n \cdot M_0^2 + \frac{n-1}{\kappa}}, \quad (2)$$

где κ - показатель адиабаты газа.

Расстояние от среза сопла до звукового сечения струи определяется из выражения [7]

$$\bar{h}_m = 9,5 \cdot \left(M_0 \cdot \sqrt{n \cdot \kappa} - \frac{1,05}{(M_0 \cdot \sqrt{n \cdot \kappa})^{2,7}} \right) \quad (3)$$

Распределение осевой скорости в переходной (сверхзвуковой) области течения свободной струи описывается выражением [4]

$$W_n = \frac{13 \cdot \sqrt{M_{эф}^2 - 1} \cdot \left(\frac{d_{эф}}{d_0}\right) \cdot W_0}{\bar{x} - \bar{S}}, \quad (4)$$

где $M_{эф}$ - число Маха на оси струи в "эффективном" сечении (в сечении, за которым газовая струя полностью расширенная); $d_{эф}$ - диаметр "эффективного" сечения струи; $\bar{S}$ - длина начального (газодинамического) участка струи.

Число Маха на оси струи в изотермическом сечении определяем по известной формуле [4]

$$M_{эф} = \sqrt{\frac{F_0}{F_{эф}} \cdot \left(M_0^2 \cdot n \cdot \cos^2 \alpha_0 + \frac{n-1}{\kappa} \right)}, \quad (5)$$

где F_0 , $F_{эф}$ - площадь выходного отверстия сопла и площадь эффективного сечения свободной струи соответственно; α_0 - угол между направлением абсолютной скорости газа на выходе из сопла и осью газового потока.

В свою очередь диаметр "эффективного" сечения струи определяется из выражения [6]

$$d_{эф} = d_0 \cdot n^{0,6} \quad (6)$$

Длина начального (газодинамического) участка струи определяется по формуле [6]

$$\bar{S} = \frac{n}{1,2 + 0,3 \cdot n} + 4 \cdot (1,05 \cdot \sqrt{n} - 0,1) \quad (7)$$

При натекании свободной турбулентной струи на преграду, которой является торец тупикового канала, струя газа разворачивается и образует граничный слой вдоль поверхности преграды.

Определим вид течения пристеночной струи вдоль днища канала. Для этого необходимо определить протяженность области ускоренного течения выражения [8] при условии $\bar{h}_1 > 6,2$

$$r_1 = 0,34 \cdot \bar{h}_1^{0,7} \cdot d_0 \quad (8)$$

Результаты расчетов показали, что во всех случаях натекания струи на заглушенный канал осуществляется ускоренное течение вдоль всей области торца канала, а относительное расстояние от среза сопла до преграды составляет $\bar{h}_1 > 6,2$.

Скорость на внешней границе пристеночного граничного слоя в дренажных отверстиях 5 и 6 [2], а также в области взаимодействия полуограниченной струи с преградой в виде боковых стенок тупикового канала при $r_1 = R_{крит}$ для ускоренного течения определяется по формуле [8]

$$u_{m1} = 3,68 \cdot \bar{h}_1^{-0,44} \cdot W_0 \cdot \left[1,5 \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} \right) - 0,5 \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^3 \right] \quad (9)$$

Заметим, что на основании работы [9] толщину пограничного слоя пристеночной струи можно считать радиусом "вторичной" струи, натекающей на боковые стенки канала. Радиус "вторичной" струи, расстояние от "вторичного" сопла до преграды, скорость на оси "вторичного" потока показаны на рис. 1. Толщину пограничного слоя импактной струи вдоль торца тупикового канала определим по формуле [9]

$$B_1 = 0,29 \cdot d_0 + 0,0812 \cdot \bar{h}_1 \quad (10)$$

Избыточное статическое давление в дренажных отверстиях 5 и 6, а также в области взаимодействия полуограниченной струи с преградой в виде боковых стенок тупикового канала при $r_1 = R_{крит}$ определяется из выражения [8]

$$P_{стат1} = \frac{\rho_{газ} \cdot W_{н1}^2}{2} \cdot e^{-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (11)$$

где $W_{н1}$ - скорость на оси свободной струи на расстоянии $\bar{h}_1$.

Коэффициент c_1 в выражении (11) при $\bar{h}_1 > 6,2$ равен [8]

$$c_1 = 5,04 \cdot \bar{h}_1^{-0,75} \quad (12)$$

Предполагаем, что истекающая из сопла струя газа является изотермической. С учетом сказанного плотность газа в дренажных отверстиях 5 и 6, а т

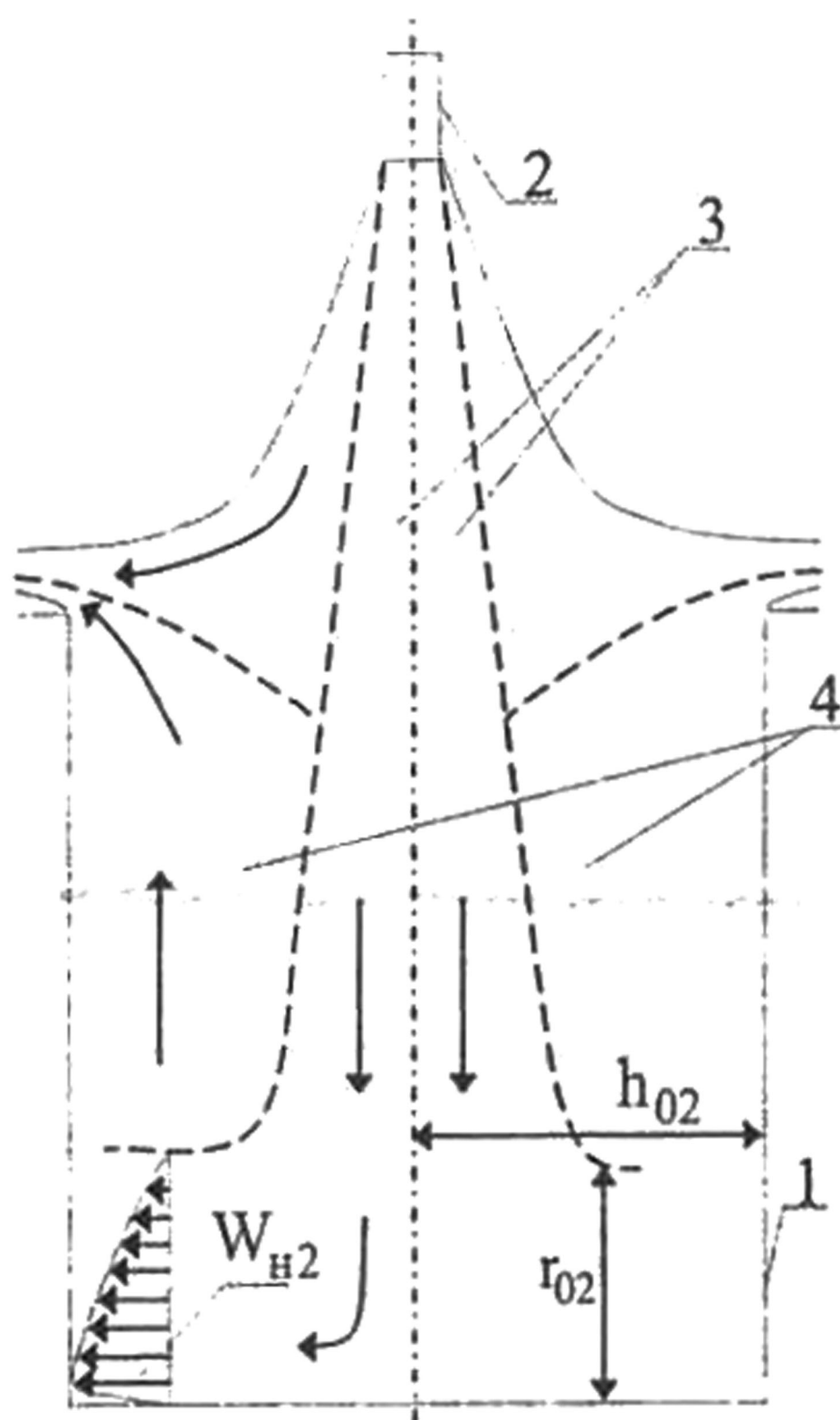


Рис. 1. Схема взаимодействия струи с тупиковым каналом при фронтальном натекании: 1 - тупиковый канал; 2 - сопло; 3 - область втекания струи в канал; 4 - область вытеснения газа из канала

же в области взаимодействия полуограниченной струи с преградой в виде боковых стенок тупикового канала при $r_1 = R_{кан.пл}$ определяется по формуле

$$\rho_1 = \frac{P_{ст1}}{R \cdot T_{атм}} \quad (13)$$

Поскольку кромки дренажных отверстий располагаются в области внешней границы пристенного пограничного слоя, динамическое давление вдоль преграды в указанных выше дренажных отверстиях определяется по формуле

$$P_{ст1} = \frac{\rho_1 \cdot u_{м1}^2}{2} \quad (14)$$

Давление торможения вдоль преграды в точке с координатой r_1 определяется по известной зависимости

$$P_{ст0} = P_{ст1} + P_{ст1} \quad (15)$$

В дальнейшем расчет газодинамических характеристик пограничного слоя, образующегося при натекании "вторичной" струи на боковую стенку тупикового канала, проводится на основании предположений, высказанных выше.

Избыточное статическое давление в дренажных отверстиях 1-4 и 7-10 определяется по формуле (11), в которой $W_{н2}$ - скорость на оси "дорасширенной" до атмосферного давления струи, и $\bar{r}_2$ - расстояние вдоль преграды (вдоль боковой стенки тупикового канала).

Скорость на оси вторичной струи $W_{н2}$, натекающей на боковую стенку тупикового канала, представляет собой сумму скорости потока газа на внешней границе пристенного пограничного слоя $u_{м1}$ в области взаимодействия пограничного слоя с боковой стенкой канала и дополнительной скорости потока за счет "дорасширения" газовой струи $W_{н2,дор}$

$$W_{н2} = u_{м1} + W_{н2,дор} \quad (16)$$

Увеличение осевой скорости струи газа за счет ее "дорасширения" можно определить по формуле

$$W_{н2,дор} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{ст изб}}{\rho_{атм}}} \quad (17)$$

где $P_{ст изб}$ - избыточное статическое давление в газовой струе в области взаимодействия ее с боковой стенкой тупикового канала.

Результаты расчетов показали, что во всех случаях натекания струи на заглушенный канал относительное расстояние от среза сопла до преграды составляет $\bar{h}_2 < 6,2$.

Коэффициент c_2 в формуле (11) при $\bar{h}_2 < 6,2$ равен [8]

$$c_2 = 1,48 \cdot \bar{h}_2^{-0,1} = 1,48 \cdot \left(\frac{R_{кан.пл}}{2 \cdot B_1} \right)^{-0,1} \quad (18)$$

Определим вид течения пристеночной струи вдоль стенок канала. Для этого необходимо определить протяженность области ускоренного течения из выражения [8] при условии $\bar{h}_2 < 6,2$

$$r_{*2} = \bar{h}_2^{0,1} \cdot d_0 = \bar{h}_2^{0,1} \cdot (2 \cdot B) \quad (19)$$

Расчеты показали, что при натекании "вторичной" струи на заглушенный канал вдоль стенок канала реализуется ускоренный и переходный виды течения.

Максимальная скорость на внешней границе пограничного слоя в случае расположения преграды в основном участке струи ($\bar{h}_2 < 6,2$) определяется по формуле [8]

$$u_{*2} = \bar{h}_2^{-0,12} \cdot W_{н2} \quad (20)$$

Скорость на внешней границе пристенного пограничного слоя в дренажных отверстиях 1-4 и 7-10 определяется по формулам [8]:

для области ускоренного течения

$$u_{м2} = \left[1,5 \cdot \left(\frac{r_2}{r_{*2}} \right) + 0,5 \cdot \left(\frac{r_2}{r_{*2}} \right)^3 \right] \cdot u_{*2} \quad (21)$$

для области переходного течения

$$u_{м2} = \left(\frac{2,5}{\bar{h}_2^{-0,21}} \cdot \bar{r}_2 \cdot e^{-\left(\frac{\bar{r}_2}{\bar{h}_2} \right)} \right) \cdot W_{н2} \quad (22)$$

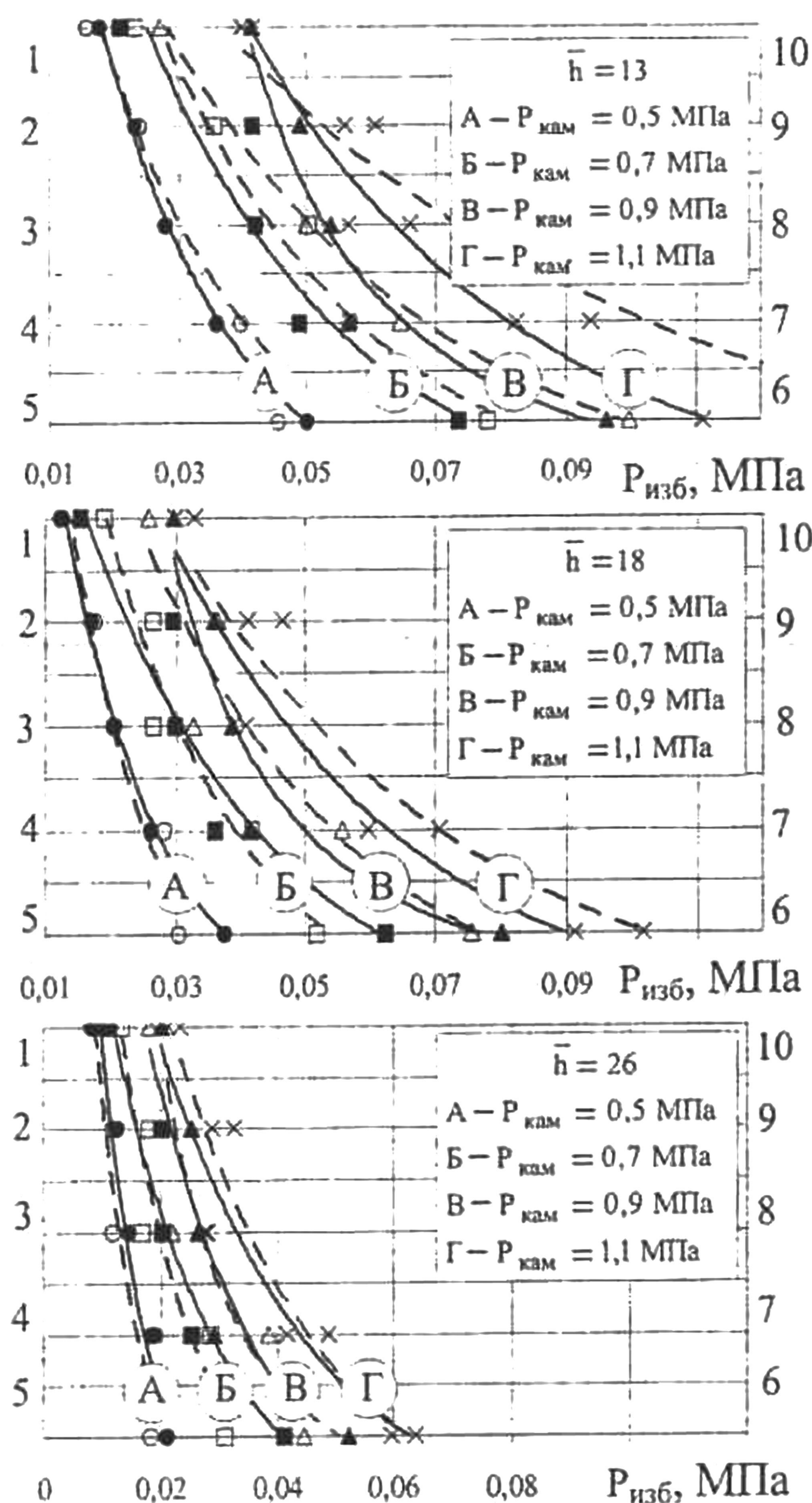


Рис. 2. Схема измерения и сравнение давлений газового потока на внутреннюю поверхность тупикового канала ($P_{изб}$) при фронтальном натекании струи при различных расстояниях от среза сопла до тупикового канала ($\bar{h} = h/d_0$) и различных давлениях газа перед соплом ($P_{кам}$): — экспериментальные данные; — — — расчетные данные; 1...5 и 6...10 на оси ординат графиков-точки измерения давления

Скоростное давление и давление торможения газа в дренажных отверстиях 1-4 и 7-10 определяются по зависимостям (14-15).

Результаты математического моделирования распределения давления газа на внутреннюю поверхность тупикового канала при фронтальном натекании

нии струи приведены на рис. 2.

Выводы

В случае, когда преграда (торец тупикового канала) находится в основном (дозвуковом) участке струи, предложенная математическая модель с достаточной точностью описывает процессы взаимодействия газовой струи с преградой, а также распределение газодинамических параметров в пограничном слое полуограниченной струи. Наблюдается тенденция к уменьшению различия экспериментальных и расчетных данных при уменьшении давления газа перед соплом либо увеличении расстояния до преграды.

Если преграда находится в переходном (сверхзвуковом) участке струи, результаты расчета характеристик импактной струи на основании предложенного метода сопоставимы с экспериментальными данными. Некоторое отклонение теории от эксперимента наблюдается в области взаимодействия пограничного слоя свободной газовой струи с преградой, что может быть объяснено недостаточностью исследования газодинамики течения в сверхзвуковом ядре струи.

Библиографический список

1. Гичев Ю.А., Перцевой В.А. Экспериментальное исследование запирающих свойств газовой струи, Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць НМетУ. — Дніпропетровськ: «ПП Грек О.С.», 2006. — С. 68-76.
2. Гичев Ю.А., Перцевой В.А. Результаты экспериментального исследования запирающих свойств газовой струи при газодинамической отсечке шлака // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2006. — № 7. — С. 208-211.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Машиностроение, 1991. — 532 с.
4. Лухтура Ф.И. Одномерная теория сверхзвуковых нерасчетных струй газа // Изв. АН СССР, МЖТ. 1993. — № 1. — С. 48-56.
5. Нешерет П.А., Ленцов И.А. К оценке дальности сверхзвуковой газовой струи // Изв. вузов. Сер. Энергетика. — 1988. — № 10. — С. 84-88.
6. Анцупов А.В. Исследование параметров нерасчетной сверхзвуковой струи газа // ЖТФ. — 1974. — 44. — № 2. — С. 372-379.
7. Нешерет П.А., Капустин Е.А., Шлик О.Э. К расчету течения в основном участке сверхзвуковой струи с учетом влияния торца сопла // Журн. САН СССР ПМТФ. — 1984. — № 5. — С. 81-85.
8. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. — М: Машиностроение, 1977. — 312 с.
9. Красников В.В., Данилов В.А. Исследование тепло- и массообмена при сопловой сушке // ИФЖ. 1965. — Т.9. — № 5. — С. 632-639.

Поступила 02.04.07