

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СТРУИ В КАРЬЕРЕ

В работе приведена методика расчета взаимодействия турбулентной газожидкостной реактивной струи с наклонной преградой в карьере.

У роботі наведена методика розрахунку взаємодії турбулентного газорідного реактивного струменя з похилою перешкодою у кар'єрі.

The method calculation of co-operation the turbulent gas-liquid reactive stream is in-process resulted with a sloping barrier in a open-cast.

Введение. В глубоких карьерах горнорудной промышленности пылегазовый режим на рабочих площадках превышает предельно допустимые концентрации вредных веществ в десятки раз, а загрязненный карьерный воздух является источником загрязнения окружающей среды. В этой связи подавление и нейтрализация пылегазовых выбросов в карьере является актуальной социальной и экологической задачей. Среди известных средств, обеспечивающих решение указанных задач, важное место занимают реактивные струи авиационных двигателей, оснащенные дополнительными устройствами для впрыска воды или другого жидкого агента в зоне выходного сечения. Такого рода установки обеспечивают создание высокоскоростной струи, наполненной мелкодисперсными каплями жидкого агента, которая обладает значительной дальностью, способностью аэрации больших объемов, орошения и пылегазоподавления на значительных площадях. При использовании газожидкостных струй в карьерах для орошения рабочих площадок и экскаваторных забоев, связывания мелких фракций пыли или нейтрализации газовых выбросов оборудования происходит взаимодействие струи с преградой, что сильно влияет на изменение кинематических характеристик исходной струи и изменяет ее несущие способности.

В этой связи **целью исследований** ставилось разработка математической модели формирования и развития газожидкостной струи, а также методов расчета параметров струи при её взаимодействии с преградами в карьере, например, при орошении экскаваторных забоев, площадок складирования, буровых и других рабочих участков и площадей с целью пылегазоподавления.

Изложение основного материала исследований.

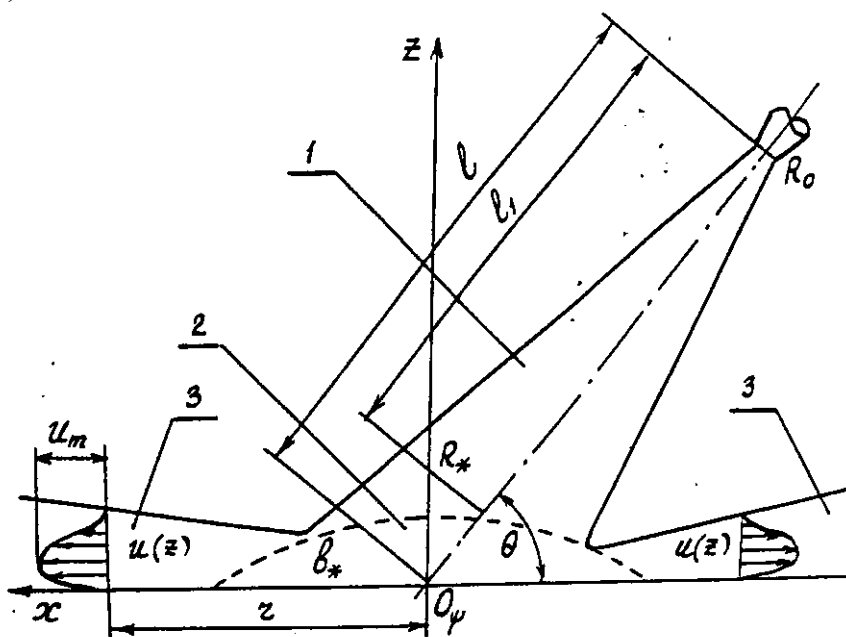
Несмотря на значительные успехи в теории струй, комплекс задач о расчете взаимодействия струй с различными преградами еще не достаточно глубоко проработан и требует своего дальнейшего развития как в теоретическом, так и в эмпирическом плане.

При использовании реактивных газожидкостных турбулентных струй для пылегазоподавления в карьерах, в зависимости от направления ветра в экскаваторных забоях, применяются различные схемы взаимодействия струи с рабочими площадками, уступами и горно-транспортным оборудованием.

Ниже приведена методика расчета взаимодействия турбулентной осесимметричной струи газа (в предположении о его несжимаемости), распространяющегося в неподвижной среде с той же (или близкой) плотностью, с наклонной бесконечной преградой. Методика основана на использовании экспериментальных данных [1], [2] и несколько видоизменена нами с целью упрощения расчета.

Взаимодействие струй с преградами, расположенными под прямым углом к набегающей струе, рассматривалось в работах [1] и [3]. В работе [4] представлены измерения скоростных напоров в плоскости симметрии струи, соударяющейся под произвольным углом с плоской преградой.

Течение в струе, соударяющейся с наклонной преградой условно можно разбить на три зоны: свободная струя, зона разворота и струя, стелющаяся по преграде (рис. 1).



- 1 – набегающая свободная струя; 2 – зона разворота потока;
3 – стелющаяся по преграде струя.

Рис. 1. Схема наклонного взаимодействия струи с бесконечной преградой.

Как показали опыты, выполненные в [1, 2], статическое давление по оси свободной струи вплоть до зоны разворота практически не отличается от давления на оси обычной затопленной струи, т.е. вплоть до зоны разворота параметры течения в струе подчиняются обычным закономерностям, изложенным в [5].

В зоне разворота имеет место сложное пространственное течение, которое характеризуется значительным изменением давления и большой кривизной линий тока. Сама зона имеет поперечный размер порядка диаметра свободной струи в месте (точке O_{ψ}) соприкосновения струи с преградой.

На рис. 2 приведена эпюра безразмерного статического давления в зоне разворота для осесимметричной струи с параметрами $\theta=45^{\circ}$, $\bar{l}=l/R_0=20$ (R_0 – радиус выходного сечения сопла) вдоль различных лучей $\psi=0^{\circ}$ (течение впе-

ред), $\psi=90^\circ$, 270° (боковое растекание) и $\psi=180^\circ$ (возвратное течение). Коэффициент избыточного давления \bar{P} отнесен к тому скоростному потоку $\rho \frac{W_m^2}{2}$ который был бы в точке O_ψ в свободной струе при отсутствии препятствия.

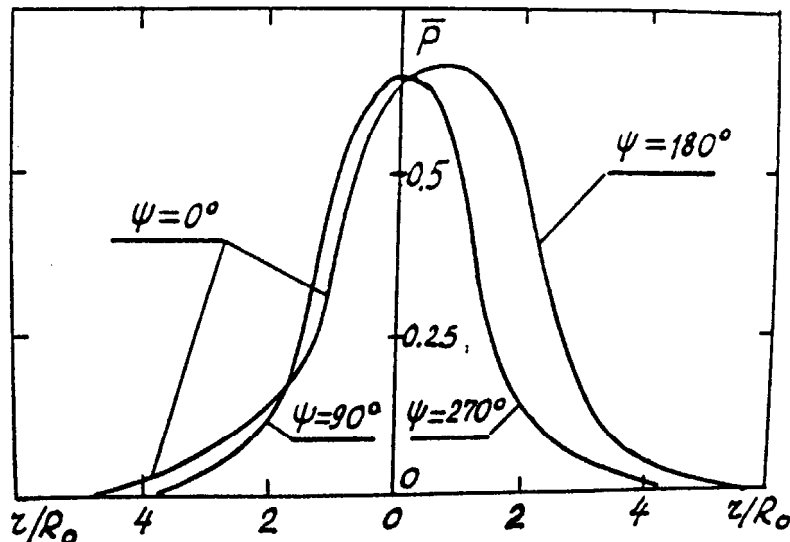


Рис. 2. Распределение давления по преграде при наклонном набегаии на нее струи ($l=l/R_0=20$; $\theta=45^\circ$)

Примерный радиус струи на расстоянии l от среза сопла равен:

$$\frac{R_{СТ}}{R_0} = (R_0 + 0,22 \cdot l) / R_0$$

где коэффициент $c = 0,22$ – стандартное значение коэффициента расширения струи на основном участке, т.е.

$$\frac{R_{СТ}}{R_0} = 5,4$$

Из графика рис. 2 видно, что в зоне разворота при $r/R_0 \sim 5$ статическое давление близко к атмосферному, что и позволяет считать, что размер зоны разворота $r_{з.р}$ примерно равен радиусу струи в точке O_ψ .

Область течения стелющаяся по поверхности преграды, характеризуется постоянным давлением (как по высоте струи, так и по ее длине), практически равным атмосферному. Движение в этой области носит радиальный характер; оно происходит таким образом, как если бы оно распространялось из цилиндрического источника, центр которого смещен относительно точки пересечения оси струи с преградой (точки O_ψ на рис. 4).

Результаты замера распределения радиальной компоненты по вертикали в различных точках преграды, показали, что профили скорости в координатах

$$\bar{U} = \frac{U}{U_m} \text{ и } \bar{z} = \frac{z}{z_{0,5}}$$

являются подобными, где U_m – максимальное значение ско-

рости на данной вертикали, $z_{0,5}$ – полутолщина стелющейся струи (расстояние по нормали от преграды до точки, в которой $U=0,5U_m$). Причем, при $z \geq \delta$ профиль удовлетворительно описывается формулой Шлихтинга

$$\bar{U} = \left(1 - \xi^{3/2}\right)^2, \quad (1)$$

а при $z \geq \delta$

$$\bar{U} = (z / \delta)^{1/n}, \quad (2)$$

где δ – толщина пограничного слоя,

$$\xi = \frac{z - \delta}{b - \delta}, \quad (3)$$

b – толщина струи;

n – показатель, равный $n \approx 10$ (по данным [6]).

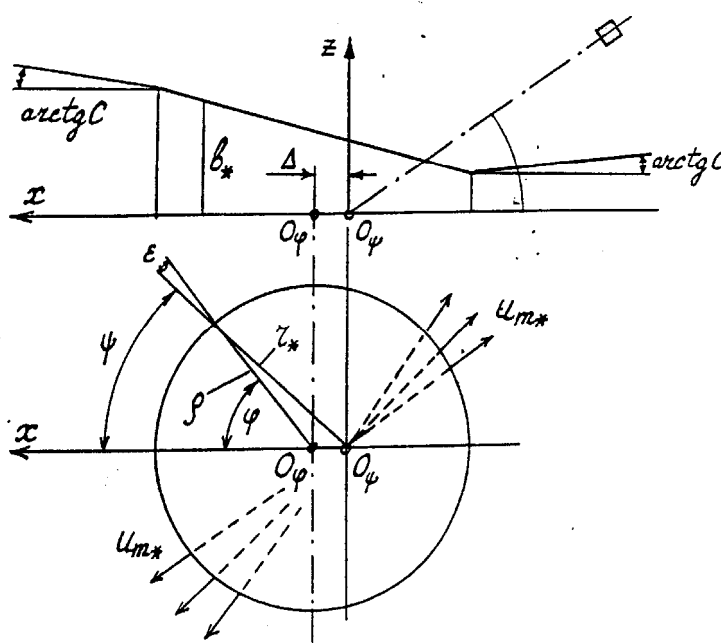


Рис. 3. Схема геометрии зоны разворота стелющейся струи

С удалением от центра распространения струи (точки O_ψ) толщина струи, при каждом фиксированном значении ψ , нарастает по линейному закону

$$\frac{b - b_n(\psi)}{r - r_n(\psi)} = c, \quad (4)$$

где $b_n(\psi)$ и $r_n(\psi)$ – некоторые начальные значения толщины струи и радиуса.

Относительно константы c данные экспериментов несколько противоречивы: от значения $c=0,22$ (что соответствует закону расширения свободной струи) до величины $c=0,16$, полученной в опытах [1, 2]. Из этих же опытных

данных также следует, что угол наклона границ струи по отношению к плоскости преграды, равный $\arctg c$, не зависит от угла соударения θ и угла ψ .

Выполненные экспериментальные данные положены в основу схемы течения, которая позволяет осуществить приближенный расчет зоны разворота и стелющейся струи. Основные положения этой схемы состоят в следующем:

- после зоны разворота течение реализуется в такой форме, которая имела бы место при истечении из кольцевого источника, образуемого круговым цилиндром переменной высоты b_* ;

- центр источника O_φ смещен относительно точки O_ψ (точки пересечения оси струи с плоскостью экрана) на величину Δ ;

- максимальная скорость на выходе из источника одинакова по всем направлениям и равна U_{m*} ;

- истечение происходит в направлении радиусов, проведенных из точки O_ψ ;

- верхнее основание источника, согласно опытным данным, приближенно представляет плоскость, наклоненную к плоскости экрана под некоторым углом (т.е. верхнее основание источника представляет собой косой срез цилиндра).

Из этих положений следует, что высота образующих кольцевого источника в зависимости от направления распространения выражается формулой

$$b_* = A + B \cos \varphi, \quad (5)$$

где угол φ отличается от угла ψ на величину ε (которая зависит от ψ). Радиус цилиндрического источника ρ не равен радиусу свободной струи R_* при подходе к плоскости преграды.

$$\rho = k R_* \quad (6)$$

Величина k является опытной константой. Она определялась из условия наилучшего соответствия величин b_* и r_* в соотношении (4) и оказалась равной $k = 1,5$.

Таким образом для определения течения на выходе из зоны разворота необходимо определить три геометрических параметра A , B и Δ , которые зависят от угла соударения струи с плоскостью θ , формы профиля продольной скорости в свободной струе перед зоной разворота, и один кинематический параметр U_{m*} , который зависит от величины и распределения скорости W в свободной струе на выходе в кольцевой источник.

Параметры струи непосредственно перед зоной разворота определяются по известным закономерностям свободной струи [5].

Используя геометрические соотношения, законы сохранения массы, импульса и кинетической энергии, а также профили подобия для скоростей, расчет можно свести к следующей процедуре.

Введем следующие обозначения

$$U_*(z) = U_{m*} f(\bar{z}), \quad \bar{z} = z / b_*, \quad (7)$$

$$W_*(z) = W_{m*} f_0(\bar{R}), \quad \bar{R} = R / R_*, \quad (8)$$

$$U_{m*} = \alpha W_{m*}, \quad \bar{\Delta} = \frac{\Delta}{\rho}, \quad I_j = \int_0^\pi \frac{\cos^j \varphi d\varphi}{\sqrt{I + 2\bar{\Delta} \cos \varphi + \bar{\Delta}^2}}, \quad (9)$$

$$\bar{A} = k \frac{A}{R_*}, \quad \bar{B} = k \frac{B}{R_*}, \quad k = \frac{\rho}{R_*}, \quad (10)$$

где R – радиальное расстояние от оси свободной струи до произвольной точки; R_* – граничный радиус струи перед зоной разворота; W_{m*} – максимальная скорость на оси струи перед зоной разворота; U_{m*} – максимальная скорость на выходе из кольцевого источника (не зависит от φ); $f(\bar{z})$ – профиль скорости на выходе из кольцевого источника; $f_0(\bar{R})$ – профиль скорости в свободной струе в месте входа в зону разворота;

Формулы для расчета необходимых параметров имеют вид

$$\alpha = \left(\int_0^1 f_0(\bar{R}) \bar{R} d\bar{R} \int_0^1 f(\bar{z}) d\bar{z} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^1 f_0(\bar{R}) \bar{R} d\bar{R} \int_0^1 f^3(\bar{z}) d\bar{z} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

$$\beta = 2 \left(\int_0^1 f_0(\bar{R}) \bar{R} d\bar{R} \right) \left(\int_0^1 f(\bar{z}) d\bar{z} \right)^{-1}, \quad (12)$$

$$\gamma = 2 \left(\int_0^1 f_0^2(\bar{R}) \bar{R} d\bar{R} \right) \left(\int_0^1 f^2(\bar{z}) d\bar{z} \right)^{-1}, \quad (13)$$

$$\bar{\Delta} = \cos \theta \left(2 \int_0^1 f_0(\bar{R}) \bar{R} d\bar{R} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

$$\bar{A} = \frac{\beta \pi}{2\alpha(I_0 - \bar{\Delta}I_1)}, \quad (\text{при } \bar{\Delta} < 0,6: \bar{A} \sim \frac{\beta}{2\alpha}), \quad (15)$$

$$\bar{B} = \frac{-\bar{A}(\bar{\Delta}I_0 + I_1) + \frac{1}{2} \pi \gamma \cos \theta \alpha^{-2}}{(I_2 - \bar{\Delta}I_1)}, \quad (16)$$

$$b_* = A + B \cos \varphi, \quad (17)$$

Особенность расчета состоит в том, что заранее положение верхнего основания кольцевого источника неизвестно. Поэтому, сначала расчет параметров на входе в источник определяется по формулам для расстояния от среза сопла до экрана (по расстоянию l , рис. 1). Затем по формулам (10) – (17) определяются геометрические параметры кольцевого источника. Полученные результаты используются для определения положения этого источника в первом приближении, что позволяет уточнить расстояние до источника (расстояние l_1 на рис. 1) и затем повторить расчет по формулам (10) – (17). Этого приближения обычно достаточно для расчета.

При расчете параметров струи перед зоной разворота можно пользоваться обычными формулами теории затопленной струи в несжимаемой жидкости, а именно, если зона разворота приходится на основной участок струи, то:

$$\frac{W_{m*}}{W_{m0}} = k_3 \frac{l}{R_0}, \quad \frac{R_*}{R_0} = k_2 \frac{l}{R_0}, \quad (18)$$

Здесь $k_2=0,22$, $k_3 = 12,4$

Если зона разворота находится настолько близко к преграде, что попадает на начальный участок струи, то видоизменение расчета заключается лишь в том, что в поперечном сечении струи нужно учесть наличие ядра потока. Подробные формулы для этого случая приведены в [5].

Дальнейший расчет стелющейся струи состоит фактически в расчете максимальной скорости U_m на каждом луче r и использовании в каждом вертикальном сечении некоторого универсального профиля.

В результате использования основных законов механики для элемента жидкости, движущегося в радиальном направлении от точки O_ψ и пренебрежении рядом малых членов, в [5] получена приближенная формула для определения зависимости $U_m(r)$:

$$U_m^2 = \alpha^2 W_{m*}^2 \frac{r_*}{r} \left[1 + \frac{CK}{\bar{A} + \bar{B} \cos \varphi} \left(\frac{r}{r_*} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (19)$$

где, в свою очередь, величины $\cos \varphi$ и r_* определяются из геометрических соотношений:

$$r_* = \rho \left(\sqrt{1 + \Delta^2 \sin^2 \psi} + \bar{\Delta} \cos \psi \right), \quad (20)$$

$$\cos \varphi = -\bar{\Delta} \sin^2 \psi + \cos \psi \sqrt{1 + \Delta^2 \sin^2 \psi}, \quad (21)$$

При этом углом, определяющим направление радиального растекания, является угол ψ , а угол φ является вспомогательной величиной, служащей для описания области разворота.

При встрече с перпендикулярной преградой для максимальной скорости получаем выражение

$$\frac{U_m}{W_0} = \frac{3,22 R_0}{\sqrt{r(r + 0,288l)}}, \quad (22)$$

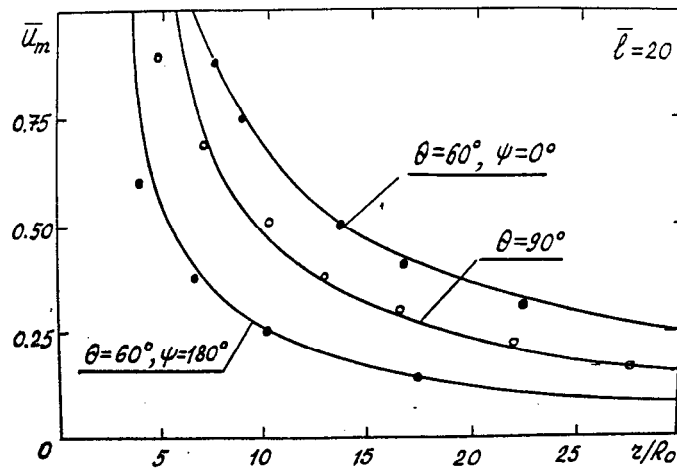
где W_0 и R_0 – скорость в выходном сечении сопла и его радиус.

Для профиля скорости на выходе из кольцевого источника и при дальнейшем распространении струи, стелющейся по преграде рекомендуется использовать профиль Шлихтинга с учетом пограничного слоя, а именно:

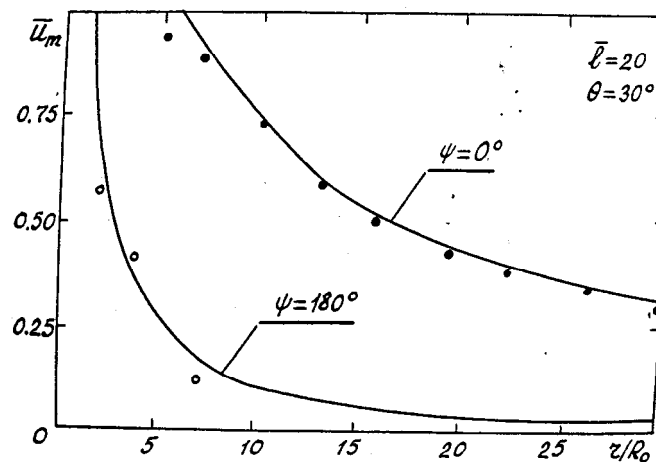
$$\bar{U} = \frac{U}{U_m} = (z / \delta)^{1/n}, \quad z \leq \delta, \quad (23)$$

$$\bar{U} = \frac{U}{U_m} = \left[1 - ((z - \delta) / (b - \delta))^{3/2} \right]^2, \quad \delta \leq z \leq b, \quad (24)$$

Результаты расчетов максимальной скорости в стелющейся по преграде струи, совместно с экспериментальными данными из [2], показаны точками на рис. 4 (а, б). Сопоставление показывает удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.



а)



б)

Рис. 4. Зависимость максимальной скорости стелющейся струи от расстояния до центра O_ψ

В заключении отметим, что характерной особенностью стелющейся струи является фактически линейный закон нарастания ее толщины вдоль каждого радиуса с очень быстрым уменьшением величины максимальной скорости U_m профиля скорости по вертикали.

Выводы.

1. Представлена математическая модель формирования и развития газожидкостной реактивной струи в карьере при её взаимодействии с преградами, например, при орошении экскаваторных забоев, площадок складирования, буровых и других рабочих участков и площадей с целью пылегазоподавления.

2. Приведены возможные схемы работы установки по формированию газожидкостной струи для гидрообеспыливания в экскаваторных забоях в зависимости от направления ветра.

3. Разработана упрощенная методика расчета взаимодействия турбулентной осесимметричной струи газа (в предположении его несжимаемости), распространяющегося в неподвижной среде с той же (или близкой) плотностью, с наклонной бесконечной преградой.

4. Показано, что течение в струе, соударяющейся с наклонной преградой, условно можно разбить на три зоны: свободная струя, зона разворота и струя, стелющаяся по преграде.

5. Выявлено, что в зоне разворота газожидкостной струи имеет место сложное пространственное течение, которое характеризуется значительным изменением давления и большой кривизной линий тока. Эта зона имеет поперечный размер сопоставимый с диаметром свободной струи в месте соударения струи с преградой.

6. Выполненные исследования положены в основу схемы течения, которая позволяет осуществить приближенный расчет зоны разворота и стелющейся газожидкостной струи в карьере.

Список литературы

1. Секундов А. Н., Яковлевский О. В. Исследование взаимодействия струи с близко-расположенным экраном //Механика и машиностроение, 1964.- №1.- С. 66-70.
2. Крашенинников С. Ю., Яковлевский О. В. Распространение турбулентной струи, соударяющейся с плоскостью //Известия АН СССР, 1966.- № 4.- С. 3-8.
3. Сычев А. Т. Результаты исследования затопленной турбулентной струи, набегающей на плоскость гладкого потолка //Известия АН СССР, 1964.- Т.7.- 248 с.
4. Структурные течения жидкостей и газов //Тезисы Всесоюзной научной конференции (2-5 июня 1982г., Новополоцк), Ч. 3.- Новополоцк, 1982.- С. 11-32.
5. Теория турбулентных струй /Под. ред Абрамовича.-М.: Наука, 1984.- 716 с.
6. Сакипов З. Б. Теория и методы расчета полуограниченных струй и настильных факелов.- Алма-Ата: Наука, 1978.- 216 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Кременчуцьким М.Ф.
Надійшла до редакції 25.10.10*